



Kuituominaisuuksien vaikutus luonnonkuitu- komposiittien ominaisuuksiin

Hanna Parkkinen
Maisterintutkielma
Helsingin yliopisto
Metsätieteiden maisteriohjelma
Metsien ekologia ja käyttö
Toukokuu 2018

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution– Department Metsätieteiden osasto	
Tekijä/Författare – Author Hanna Parkkinen			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Kuituominaisuuksien vaikutus luonnonkuitukomposiittien ominaisuuksiin			
Oppiaine /Läroämne – Subject Metsien ekologia ja käyttö			
Työn laji/Arbetets art – Level Maisterintutkielma		Aika/Datum – Month and year Toukokuu 2018	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 66
<p>Muovin käytön vähentäminen on noussut ajankohtaiseksi aiheeksi ja samanaikaisesti metsäteollisuus etsii uusia mahdollisuuksia kuidun käytölle. Kasvanut ympäristötietoisuus yhdessä ympäristösäädösten ja lainsäädännön kanssa, ovat pakottaneet materiaalituottajia ja teollisuutta valitsemaan ympäristöystävällisiä ratkaisuja tuotteille. Luonnonkuiduissa komposiittien lujitteena on iso potentiaali, koska ne ovat biohajoavia, ympäristöystävällisiä, runsaasti saatavilla ja kustannustehokkaita verrattaessa synteettisiin lujitteisiin. Luonnonkuiduilla on myös suotuisat mekaaniset ominaisuudet, kuten hyvä vetolujuus sekä kimmomoduuli.</p> <p>Tämän tutkimuksen tavoitteena on tarkastella luonnonkuitujen käyttöä komposiiteissa ja kuinka kuituominaisuudet vaikuttavat luonnonkuitukomposiittien ominaisuuksiin. Kokeellisessa osiossa valmistettiin arkkeja koivu- ja eukalyptussellusta sekä komposiitteja yhdistäen arkkeja ja kahta eri polymeeriä. Työssä tutkittiin koivu- ja eukalyptuskuitujen eroja, sekä jauhatuksen vaikutusta ominaisuuksiin. Lisäksi vertailtiin arkkien ja komposiittien mekaanisia ominaisuuksia ja polypropeenin (PP) ja polylaktidin (PLA) eroja. Arkeista ja komposiiteista mitattiin vetolujuus, taivutusjäykkyys, kimmomoduuli ja murtovenymä. Lisäksi komposiittien ja arkkien rakennetta tarkasteltiin optisella mikroskopiolla.</p> <p>Polylaktidista valmistetuilla komposiiteilla saatiin parempi vetolujuus ja niillä oli korkeampi kimmomoduuli verrattaessa polypropeenista valmistettuihin komposiitteihin. Polypropeenikomposiiteilla oli parempi murtovenymä ja taivutuslujuus. Arkeilla on selkeästi parempi kimmomoduuli kuin polypropeenilla ja tämän takia yhdistettäessä arkkeja ja polypropeenin jäykkyys alenee verrattaessa kuitumateriaaliin. Myös murtovenymä oli arkeilla hyvä, varsinkin verrattaessa polylaktidista valmistettuihin komposiitteihin. Kuitujen jauhatuksella saatiin parannettua arkkien mekaanisia ominaisuuksia, ainoastaan taivutusjäykkyyteen jauhatuksella ei ollut huomattavaa vaikutusta. Kuidun jauhatuksella nähtiin pääsääntöisesti samat vaikutukset komposiittien tuloksiin. Koivu- ja eukalyptuskuitujen erot tuloksissa ovat suhteellisen pienet. Koivulla saadaan hieman parempi vetolujuus ja murtovenymä, mutta eukalyptuksesta valmistetut arkit ovat jäykempiä. Tulokset osoittavat, että yhdistettäessä kuitua ja muovia komposiitiksi, saadaan hyviä ominaisuuksia verrattuna arkkien tai puhtaan polymeerin ominaisuuksiin.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Luonnonkuitukomposiitti, biokomposiitti, kuitu, kuituominaisuudet, polylaktidi (PLA), polypropeeni (PP)			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsingin yliopiston kirjasto – Helda / E-thesis (opinnäytteet) ethesis.helsinki.fi			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information Ohjaajat: Marketta Sipi (HY), Juha Rikala (HY), Jouni Paltakari (Aalto-yliopisto)			

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos/Institution – Department Department of Forest Sciences
Tekijä/Författare – Author Hanna Parkkinen		
Työn nimi / Arbetets titel – Title The effect of fiber characteristics on the properties of natural fiber composites		
Oppiaine /Läroämne – Subject Forest ecology and management		
Työn laji/Arbetets art – Level Master's thesis	Aika/Datum – Month and year May 2018	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 66
<p>Reducing the use of plastic has become an important topic and at the same time the forest industry is looking for new opportunities for fiber use. Increased environmental awareness, together with environmental regulations and legislation, have forced manufacturers and industry to choose environmentally friendly solutions for products. Natural fiber reinforced composites have great potential because they are biodegradable, environmentally friendly, abundant and cost-effective when compared to synthetic reinforcements. Natural fibers also have favorable mechanical properties such as good tensile strength and elastic modulus.</p> <p>The aim of this study is to examine the use of natural fibers in composites and how fiber properties affect the properties of natural fiber composites. In the experimental part of the research handsheets of birch and eucalyptus pulp were prepared. In addition, composites were prepared combining handsheets and two polymers. The differences between the birch and eucalyptus fibers were studied and also the effect of refining on the properties. In addition, the mechanical properties of sheets and composites were compared and also differences between polypropylene (PP) and polylactide (PLA). The mechanical properties tested were tensile strength, bending stiffness, elastic modulus and break elongation. In addition, the structure of composites and sheets were examined with optical microscopy.</p> <p>Composites made from polylactide had a better tensile strength and higher elastic modulus when comparing to polypropylene composites. Elongation and bending stiffness were improved with the polypropylene composites. On the sheets there is a clearly better elastic modulus than in the case of polypropylene. When the sheets and polypropylene are combined, the elastic modulus decreases when compared to the fibers. In addition, the elongation of the sheets was good, especially when comparing the polylactide composites. By refining the fibers, the mechanical properties of the sheets were improved. The refining of the fibers was generally seen to have the same effects on the composite results. The differences between birch and eucalyptus fibers are relatively small. With the birch fibers slightly better tensile strength and elongation are obtained but the eucalyptus sheets are stiffer. The results show that when combining fibers and plastic as a composite, many good mechanical properties are obtained in comparison with the properties of the sheets or the pure polymer.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Natural fiber composite, biocomposite, fiber, fiber properties, polylactide (PLA), polypropylene (PP)		
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsinki University Library – Helda / E-thesis (E-Thesis) ethesis.helsinki.fi		
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information Supervisors: Marketta Sipi, Juha Rikala, Jouni Paltakari		

ESIPUHE

Tämä työ on Helsingin yliopiston Metsätieteiden laitoksen pro gradu -tutkielma. Tutkimus on tehty yhteistyössä Aalto-yliopiston kanssa ja kokeellinen osio suoritettiin Aalto-yliopiston Biotuotteiden ja biotekniikan laitoksen tiloissa.

Haluan kiittää Marketta Sipiä ja Juha Rikalaa työn ohjauksesta ja neuvoista työn aikana. Erityisesti kiitokset Jouni Paltakarille mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta suorittaa kokeellinen osio Aalto-yliopiston tiloissa. Testikappaleiden valmistus ja kokeet eivät olisi onnistuneet ilman hyvää ja kannustavaa opastusta.

Kiitokset myös perheelle ja ystäville tuesta, kannustuksesta ja ymmärtäväisyydestä työn aikana.

Espoossa 12.05.2018

Hanna Parkkinen

Sisällysluettelo

ESIPUHE	3
1. JOHDANTO	6
2. Luonnonkuidut	7
2.1 Luonnonkuitujen jaottelu	7
2.2 Luonnonkuitujen rakenne	8
2.3 Luonnonkuitujen ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä	9
2.4 Puukuidut	10
2.4.1 Havupuu	12
2.4.2 Lehtipuu	14
2.5 Muut luonnonkuitukomposiiteissa käytetyt kasvikuidut	15
2.5.1 Niinikuidut	15
2.5.2 Lehtikuidut	18
2.5.3 Siemenkuidut	19
2.5.4 Hedelmäkuidut	20
2.5.5 Varsikuidut	20
2.5.6 Ruoko- ja ruohokuidut	21
3. Matriisipolymeerit	21
3.1 Matriisi	21
3.2 Biopolymeerit	22
3.2.1 Polylaktidi	24
3.3 Polyolefiinit	25
4. Luonnonkuitukomposiitit	25
4.1 Luonnonkuitujen käyttö komposiiteissa	26
4.2 Luonnonkuitukomposiittien sovelluksia ja mahdollisuuksia	29
5 Aineisto ja menetelmät	30
5.1 Materiaalit	31
5.2 Näytteenvalmistus	32
5.2.1 Jauhatus	32
5.2.2 Schopper Riegler-testi	33
5.2.3 Arkkien valmistus	33
5.2.4 Komposiittien valmistus	34
5.3 Testausmenetelmät	37
5.3.1 Taivutuskoe	38

5.3.2 Vetokoe	38
5.3.3 Mikroskooppinen tarkastelu	39
6. Tulokset	40
6.1 Taivutusjäykkyys.....	40
6.2 Vetokoe	41
6.2.1 Murtovenymä.....	41
6.2.2 Vetolujuus	43
6.2.3 Kimmomoduuli	43
6.2.4 Vetojäykkyys.....	44
6.2.5 Vetomurtotyö.....	44
6.3 Mikroskooppinen tarkastelu	45
7. Tulosten tarkastelu.....	48
7.1 Kuituominaisuuksien tarkastelu.....	48
7.2 Komposiitit	49
8. JOHTOPÄÄTÖKSET.....	51
9. LÄHTEET.....	53
LIITE 1 - SR-luku	61
LIITE 2 - Ilmanläpäisevyys.....	61
LIITE 3 - Mittaustulokset	62
LIITE 4 - Voimavenymäkäyrät.....	63

1. JOHDANTO

Vaatimukset materiaalien keveydestä, ympäristöystävällisyydestä ja energiatehokkuudesta ovat vaikuttaneet teollisuuden käyttämiin prosesseihin sekä materiaaleihin, niin että näissä keskitytään yhä enemmän uusiutuviin ratkaisuihin (Stokke ym. 2014). Viime aikoina on keskusteltu paljon muovien haittavaikutuksista ja muovin kertymisestä luontoon. Muovin käytön vähentäminen on noussut ajankohtaiseksi aiheeksi ja samanaikaisesti metsäteollisuus etsii uusia mahdollisuuksia kuidun käytölle. Kasvanut ympäristötietoisuus, kuten tietoisuus lisääntyvästä maailmanlaajuisesta jäteongelmasta, yhdessä ympäristösäädösten ja lainsäädännön kanssa, ovat pakottaneet materiaalituottajia ja teollisuutta valitsemaan ympäristöystävällisiä ratkaisuja tuotteen koko elinkaarelle (Bismarck ym. 2005). Luonnonkuiduissa komposiittien lujitteena on iso potentiaali, koska ne ovat biohajoavia, ympäristöystävällisiä, runsaasti saatavilla ja kustannustehokkaita verrattessa synteettisiin lujitteisiin (Thakur ym. 2013). Luonnonkuidut ovat myrkyttömiä ja niiden käytöllä on joko olemattomat tai hyvin pienet terveysriskit läpi koko elinkaaren, sisältäen tuotannon, käytön ja hävityksen (Dicker ym. 2014). Positiivisten taloudellisten ja ympäristövaikutusten lisäksi luonnonkuitujen käytöllä komposiittien lujitteena voidaan vaikuttaa parantavasti komposiittien ominaisuuksiin, kuten tiheyteen sekä jäykkyys- ja lujuusominaisuuksiin (Huda ym. 2005).

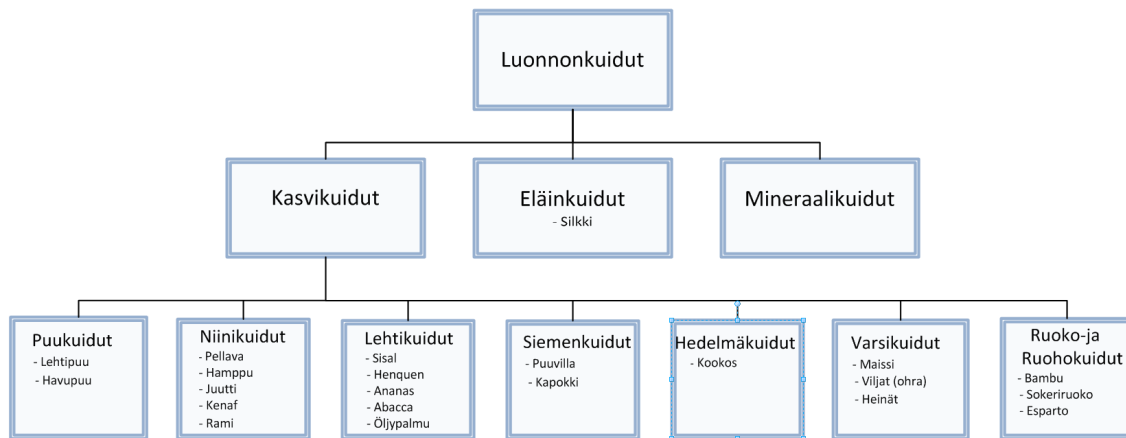
Tämän työn tavoitteena on tarkastella luonnonkuitujen käyttöä komposiiteissa ja kuinka kuituominaisuudet vaikuttavat luonnonkuitukomposiittien ominaisuuksiin. Kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi eri luonnonkuituja, niiden ominaisuuksia ja rakennetta sekä kuituominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi tarkastellaan matriisipolymeerejä, luonnonkuitujen käyttöä komposiiteissa ja luonnonkuitukomposiittien käyttökohteita sekä mahdollisuuksia. Komposiittien materiaaleilla, kuidulla ja polymeerillä, on erilaiset ominaisuudet. Komposiittien ominaisuuksiin vaikuttaa molempien materiaalien ominaisuudet (Silva ym. 2015). Kokeellisessa osiossa tutkitaan miten materiaalien ominaisuudet muuttuvat, kun ne yhdistetään komposiitiksi. Työssä tutkitaan koivu- ja eukalyptuskuitujen eroja, sekä jauhatuksen vaikutusta ominaisuuksiin. Lisäksi vertaillaan kahden polymeerin eroja seostettaessa kuituihin. Tavoitteena on tutkia, saadaanko kuitua ja muovia yhdistettäessä paremmat mekaaniset ominaisuudet kuin erillisinä materiaaleina, miten kuidun jauhatus vaikuttaa arkkien ja komposiittien ominaisuuksiin sekä miten kuitulaji

vaikuttaa mitattaviin ominaisuuksiin. Kokeellisessa osiossa suoritetaan veto- ja taivutuskoee, jonka tuloksina saadaan vetolujuus, taivutusjäykkyys, murtovenymä ja kimmomoduuli. Nämä ovat oleellisia tietoja, jotka kertovat materiaalien lujuus- ja jäykkyysominaisuuksista. Lujuus- ja jäykkyysominaisuudet ovat materiaalien oleellisia mekaanisia tietoja, joita tarvitaan esimerkiksi valittaessa komposiittien käyttökohteita ja vertailtaessa materiaaleja. Polymeereiksi valikoitui polypropeeni, joka on yksi yleisemmin käytetyistä synteettisistä polymeereistä. Toisena oli polylaktidi, joka on biopolymeeri. Näitä kahta polymeeriä on tutkittu paljon ja biohajoavana polymeerinä polylaktidi voisi olla vaihtoehto synteettiselle polypropeenille. Kokeellisen osion kuitumateriaaliksi Aalto-yliopistolta saatiin koivu ja eukalyptuskuitu. Vaikka kuidut ovat hyvin samanlaiset, on niillä kuitenkin tiettyjä rakenteellisia ja koostumuksellisia eroja. Kuidun ominaisuuksia voidaan muokata jauhatuksella. Jauhatuksen tarkoituksena on parantaa kuitujen sitoutumiskykyä ja näin vaikutetaan arkkien lujuuteen (Sirviö 2008). Kokeellisessa osiossa käytetään jauhamatonta ja jauhettua kuitua, jotta nähdään onko kuidun käsittelyllä vaikutusta tuloksiin.

2. LUONNONKUIDUT

2.1 Luonnonkuitujen jaottelu

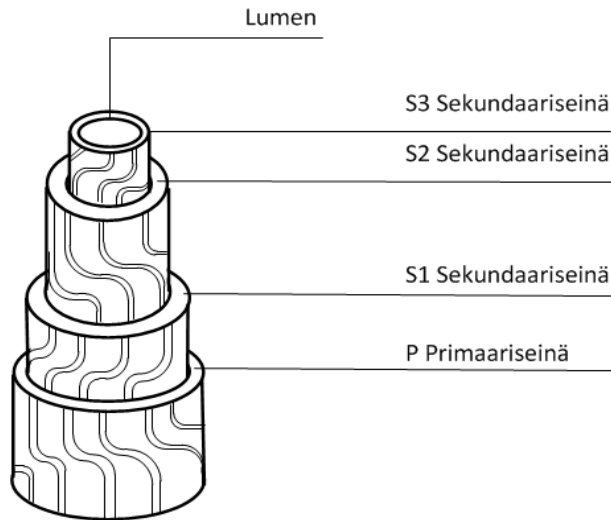
Luonnonkuidut jaetaan alkuperäislähteen mukanaan kasvi-, eläin- ja mineraalikuituihin (Rahman ym. 2015). Kasvipäiset kuidut koostuvat pääsääntöisesti selluloosasta, ligniinistä sekä hemiselluloosasta ja eläinkuidut proteiinista (Grozdanov ym. 2015). Kasvikuidut ovat kuolleita soluja, jotka esiintyvät yleensä kuitukimppuina, vaikka niitä kuvataan yksittäisinä kuituina (Bismarck ym. 2005). Kasvipäiset luonnonkuidut voidaan luokitella seitsemään ryhmään, varsi-, niini-, siemen-, lehti-, hedelmä-, ruoko- ja puukuidut (Kuva 1). Rowell (2008) jakaa luonnonkuituja tuottavat kasvit primaarisiksi ja sekundaarisiksi, sen mukaan kasvatetaanko kasveja kuitupitoisuuden takia vai tuotetaanko kuituja kasveista sivutuotteina. Sekundaarisia kasveja ovat muun muassa ananas, öljypalmu ja kookoskuitu (Faruk ym. 2012). Jatkossa luonnonkuiduilla tarkoitetaan kasvipäisiä kuituja.



Kuva 1. Luonnonkuitujen jaottelu (Bismarck ym. 2005 ja Sapuan ym. 2015)

2.2 Luonnonkuitujen rakenne

Vaikka kuitujen kemiallinen koostumus, rakenne ja ominaisuudet voivat vaihdella paljonkin lähteestä riippuen, koostuu jokainen kasvikuitu pääsääntöisesti selluloosasta, ligniinistä ja hemiselluloosasta (Stokke ym. 2014). Selluloosa on mikrofibrilleistä muodostunut sokeripohjainen polymeeri ja se antaa kuidulle sen lujuuden (Bledzki ym. 2002). Hemiselluloosa on erittäin hydrofiilinen ja se muodostaa ligniinin kanssa matriisin joka ympäröi selluloosafibrillejä tukien näitä (Area ja Popa 2014). Ligniini taas on hydrofobinen, eli vettä hylkivä ja sijaitsee välilamellissa (Bismarck ym. 2005). Ligniini antaa kasville jäykkyyden ja suojaa mikrobeilta (Jayasekara ja Amarasinghe 2010). Joffe ja Andersons (2014) mukaan kasvikuitujen selluloosapitoisuus vaihtelee välillä 40–85 %. Ligniinipitoisuus on yleensä 5–20 %, mutta voi olla joillakin luonnonkuiduilla vielä alhaisempi (Rahman ym. 2015). Hemiselluloosan osuus vaihtelee keskimäärin välillä 15–35 % (Area ja Popa 2014). Kasvikuidut voivat sisältää peruskomponenttien lisäksi muun muassa pektiiniä, vahoja ja orgaanisia ainesosia (Bledzki & Gassan 1999).



Kuva 2. Luonnonkuidun rakenne (Bismarck ym. 2005, John ja Thomas 2008)

Yksittäisen kasvikuidun pituus vaihtelee yleensä välillä 1-50 mm ja halkaisija välillä 10-50 μm (Bismarck ym. 2005), mutta joidenkin niini- ja lehtikuitujen pituudet voivat olla jopa yli 200 mm (Dicker ym. 2014). Luonnonkuidun pituuden ja leveyden suhde on tärkeä tieto verrattaessa eri luonnonkuituja, koska se kertoo kuidun lujuusominaisuuksista (Bledzki 2002). Kasvien soluseinämän perusrakenne koostuu soluontelon ympärillä olevista sekundääriseinästä, joka voidaan jakaa kolmeen eri kerrokseen, primääriseinästä ja välilamellista, joka erottaa kuidut toisistaan (Kuva 2). S2 kerros on paksuin ja tämän takia vaikuttaa eniten kuidun mekaanisiin ominaisuuksiin (Sirviö 2008). Kasvualue ja alueen ilmasto sekä kasvin ikä vaikuttavat myös kuidun rakenteeseen ja tätä kautta kuituominaisuuksiin (Bledzki & Gassan 1999). Kuitujen ominaisuuksien lisäksi kuitulähteen valintaan voi vaikuttaa myös maantieteellinen saatavuus, esimerkiksi Euroopassa on keskitytty pellavaan ja Aasiassa juuttiin, ramieen ja kenafiin (Pickering ym. 2016).

2.3 Luonnonkuitujen ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä

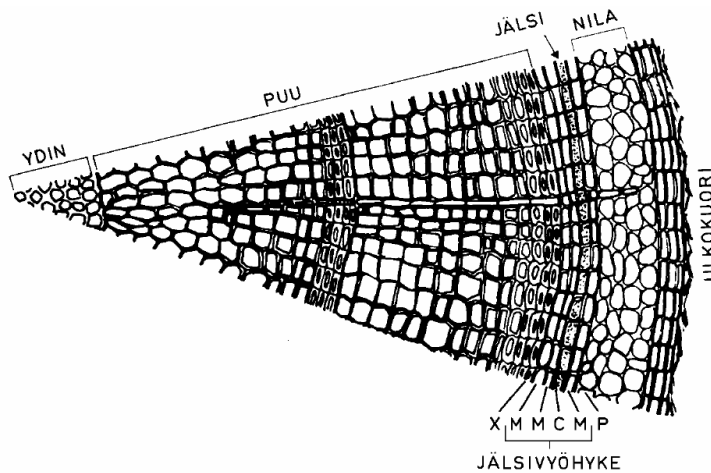
Tärkeimmät kuidun kokonaisominaisuuksiin vaikuttavat tekijät ovat kuidun rakenne, mikrofibrillikulma, joka ilmaisee mikrofibrillien suuntautumisen solun pituusakseliin nähden, solun dimensiot ja vauriot sekä kemiallinen koostumus (Bismarck ym. 2005). Luonnonkuidun mekaaniset ominaisuudet riippuvat lisäksi muun muassa polymerointiasteesta, kristalliinisuudesta ja sen asteesta. (Silva ym. 2015). Selluloosa antaa kuidulle lujuuden, joten luonnonkuidun korkea lujuus yleensä kertoo korkeasta selluloosapitoisuudesta (Winandy ym. 2008). Sirviö (2008) määrittää kuitupituuden tärkeäksi

ominaisuudeksi kuitusidosten muodostuksessa, pidempi kuitu muodostaa enemmän sidoksia muiden kuitujen kanssa ja tämän takia kuituverkosto muodostuu vahvemmaksi kuin lyhyemmällä kuidulla. Kuitupituus vaikuttaa myös vetolujuuteen ja murtositkeyteen, jotka kasvavat kuitupituuden kasvaessa (Sirviö 2008).

Hägglom-Ahnger ja Komulainen (2006) mukaan arkin valmistuksessa kuitusidosten lujuutta voidaan parantaa kuiduilla, joilla on suuri pituusmassa (mg/m), mutta suuren pituusmassan pitäisi tulla paksuista kuiduista, ei paksuseinäisistä kuiduista. Paksuuteen nähden ohutseinäiset kuidut lommahtavat helposti, ja ne muodostavat tiiviin kuituverkoston (Hägglom-Ahnger ja Komulainen 2006). Tärkeä kuidun tiheyteen ja mekaaniseen lujuuteen vaikuttava tekijä on kuidun seinän paksuus, paksuseinäisillä kuiduilla on korkea tiheys ja lujuus (Wiedenhoeft 2010). Ohutseinäisillä kuiduilla on huono taivutusjäykkyys, mutta hyvä vetolujuus (Hakkila ja Verkasalo 2009). Kuidun vetolujuus ja kimmomoduuli kasvavat selluloosaosuuden kasvaessa (Silva ym. 2015). Kuidulla, joilla on alhainen fibrillikulma, on korkea vetolujuus, myös kimmomoduuli kasvaa fibrillikulman ollessa alhainen (Sirviö 2008). Luonnonkuidun mekaaniset ominaisuudet, erityisesti lujuus, ovat riippuvaisia myös käsittelytavasta jolla kuidut irrotetaan kasvusta (Joffe ja Andersons 2014). Kuitusidoksia voidaan parantaa muun muassa sellun jauhatuksella, mutta kuitujen käsittely kuitenkin lyhentää kuituja (Sirviö 2008).

2.4 Puukuidut

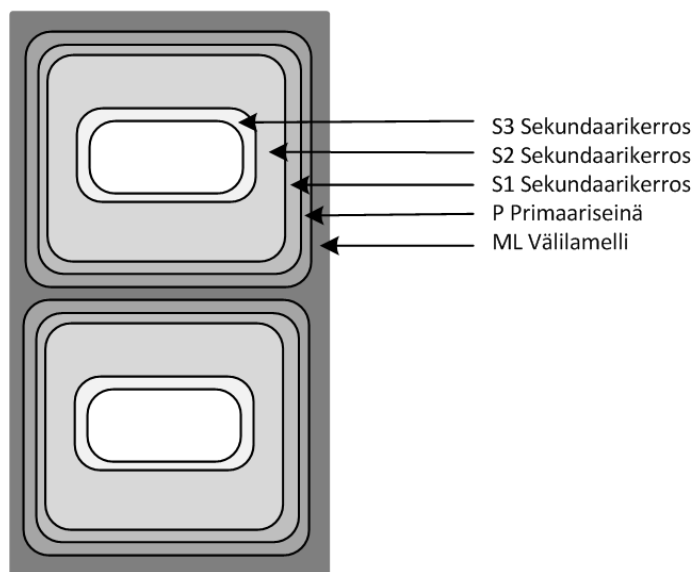
Puut jaetaan kahteen luokkaan havu- ja lehtipuuksi, joiden rakenteet eroavat toisistaan. Havupuulla on yksinkertaisempi rakenne ja vain kahta eri solutyyppeä, kun taas lehtipuulla erilaisia soluja on useampia (Wiedenhoeft 2010). Puu on anisotrooppinen aine, eli sen ominaisuudet vaihtelevat eri suunnista mitattaessa ja se kuvataan poikkileikkauksen, tangentin- sekä säteensuuntaisena leikkauksena (Alén 2009). Leikkauspinnosta voidaan erottaa ydin, vuosilustot, jotka jakautuvat kevätpuuhun ja kesäpuuhun, primääriset ja sekundaariset ydinsäteet, pihkatiehyet sekä jälsi, nila ja kuori (Stokke ym. 2014). Kuvassa 3 näkyy puun poikkileikkauspinta.



Kuva 3. Puun poikkileikkauksesta voidaan erottaa ydin, kevät- ja kesäpuu, jälsi, nila ja kuori (Puu-19.210 2007).

Kärkkäinen (2003) mukaan puun solut voidaan jakaa muodon ja toiminnan mukaan kahteen ryhmään, prosenkyymi- eli suippusoluihin ja parenkyymi- eli tylppysoluihin. Prosenkyymisolut ovat pitkiä, päistä suippenevia, täysikasvuisena kuolleita, puuta tukevia ja vettä johtavia soluja ja tylppysolut ovat pyöreähköjä, ravintoaineita varastoivia soluja (Kärkkäinen 2003). Puukuidut koostuvat pääasiassa selluloosasta, hemiselluloosasta, ligniiniä ja uuteaineista (Godavarti 2005). Uuteaineiden, kuten rasvojen, vahan, alkaloidien, pihkan ja tärkkelyksen, tehtävänä on suojata puuta ja niiden osuus on noin 1-8 % (Area ja Popa 2014).

Kuten aikaisemmin todettu kasvien soluseinämän perusrakenne koostuu soluontelon ympärillä olevista primääriseinästä, sekundääriseinästä ja välilamellista (Kuva 4). Välilamelli sisältää ligniiniä ja se suojaa soluja ja samalla sitoo solut toisiinsa, myös ohut primääriseinä sisältää suuria määriä ligniiniä ja tämän lisäksi selluloosaa ja hemiselluloosaa (Area ja Popa 2014). Álen (2009) määrittelyn mukaan puusolun syntyessä ympäröi solun protoplasmaa ohut ja joustava primääriseinä, joka alkaa paksuuntua ja tämän seurauksena syntyy sekundääriseinä. Viimeisenä vaiheena tapahtuu solun puutuminen, lignifikaatio eli ligniiniä muodostuu välilamelliin ja primääri- ja sekundääriseiniin, samalla suurin osa soluista kuolee (Álen 2009). Sekä havu- että lehtipuulla suurin osa soluista on täysikasvuisena kuolleita, mutta molemmilta löytyy myös eläviä parenkyymisoluja (Wiedenhoeft 2010).



Kuva 4. Soluseinän rakenne (Area ja Popa 2014).

Sekundääriseinä sisältää selluloosaa, hemiselluloosaa ja pienempiä määriä ligniiniä ja se jaetaan kolmeen osaan, ulompaan sekundääriseinään S1, keskimmäiseen S2 ja sisimpänä sijaitsevaan S3 (Area ja Popa 2014). Sekundääriseinän selluloosamikrofibrillit ovat suuntautuneet kuidun eri kerroksissa eri suuntiin, joista paksuin on keskimmäinen sekundääriseinä ja siitä johtuen sen kemiallinen koostumus, fibrillikulma ja muut ominaisuudet vaikuttavat koko soluseinän ja puukuidun ominaisuuksiin (Kärkkäinen 2003).

2.4.1 Havupuu

Henriksson ym. (2009) mukaan havupuita on useita satoja, joista kaupallisesti hyödynnettyimmät kasviheimot ovat mäntykasvit. Mäntykasveihin kuuluu 30 % havupuista, kuten männyn, kuuset, lehtikuuset ja douglaskuuset (Henriksson ym. 2009). Havupuilla on kahdenlaisia soluja, tylppysoluja ja trakeideja, joista trakeideja on suurin osa, yli 90 % (Area ja Popa 2014). Trakeidien tehtävä on veden kuljetus ja puun tukisoluina toimiminen (Stokke 2014). Ne ovat kapeita ja ohutseinäisiä kuituja, jotka ovat täysikasvuisena kuolleita soluja (Kellomäki 2000). Tylppysolut ovat tiiliskiven muotoisia, noin 15 µm korkeita, 10 µm leveitä ja 150- 250 µm pitkiä, jotka toimivat säteensuunnassa pääsääntöisesti varastoina (Wiedenhoeft 2010). Solut ovat yhteydessä vierekkäisiin soluihin seinässä olevien erilaisten huokosten avulla, joiden välityksellä kulkeutuu vettä ja ravinteita (Álen 2009). Eri kirjallisuuslähteiden tiedot kuitujen dimensioista poikkeavat toisistaan, mutta Area ja Popa (2014) mukaan kuusen trakeidit ovat pidempiä kuin männyn. Havupuun

trakeidit ovat keskimäärin 3 mm pitkiä, mutta esimerkiksi punapuulla trakeidit ovat keskimäärin 6 mm (Biermann 1996). Havupuun kuidut ovat pidempiä kuin lehtipuiden (Taulukko 1).

Taulukko 1. Puukuitujen dimensiota

Kuitu	Pituus ⁽¹⁾ (mm)	Leveys ⁽¹⁾ (μm)	Pituuden ja leveyden suhde ⁽²⁾	Soluseinän ⁽¹⁾ pak- suus (μm)	MFA°
Koivu	0,9-1,2	22	52	3	10-19
Eukalyptus	0,8-1	16	53	3	8-20
Kuusi	3,1	27	130	2,3-4,5	
Mänty	3	30	92	2,1-5,5	5-20

1) Häggblom-Ahnger ja Komulainen 2006

2) Sirviö 2008

Wiedenhoeft (2010) mukaan havupuu muodostuu pitkittäissuunnassa pääasiassa trakeideista ja leveyssuunnassa tylppysoluista. Joillakin lajeilla, kuten punapuulla ja katajalla esiintyy myös pituussuuntaisia tylppysoluja eli pitkittäistylppysoluja (Wiedenhoeft 2010). Muun muassa kuusella, männyllä ja lehtikuusella esiintyy pihkatiehyitä, joiden ympärillä on epiteelitylppysoluja, sekä rengashuokosellisia ydinsädetrakeideja (Biermann 1996). Ydinsäteiden tylppysolut ovat ristikentässä yhteydessä huokosilla pituussuunnassa oleviin trakeideihin (Wiedenhoeft 2010). Havu- sekä lehtipuun selluloosapitoisuus on noin 40 - 45 %, mutta havupuu sisältää vähemmän hemiselluloosaa ja enemmän ligniiniä (Taulukko 2).

Taulukko 2. Puukuitujen kemiallinen koostumus

Kuitu	Selluloosa (m-%)	Hemiselluloosa (m-%)	Ligniini (m-%)	Uuteaineet (m-%) ⁽²⁾
Koivu ⁽³⁾	41	32	22	3,2
Eukalyptus ⁽³⁾	51	25	21	1,3
Kuusi ⁽¹⁾	42	28	28	1,7
Mänty ⁽¹⁾	40	26	27	3,5

1) Häggblom-Ahnger ja Komulainen 2006

2) Henriksson ym. 2009

3) Hakkila ja Verkasalo 2009

2.4.2 Lehtipuu

Lehtipuut voidaan jakaa hajaputkiloisiin, kuten koivu, eukalyptus ja pyökki, ja kehäputkiloisiin, kuten tammi, jalava ja saarni (Álen 2009). Lehtipuun rakenne on monimutkaisempi kuin havupuun ja se muodostuu useista kuiduista, erikokoisista putkisoluista ja erilaisista kooltaan ja muodoltaan olevista parenkyymisoluihin (Wiedenhoeft 2010). Tärkeä ero havupuihin verrattaessa on putkilot (Kärkkäinen 2003). Lehtipuiden solut ovat erilaistuneet joko vedenkuljetukseen tai mekaaniseen tukemiseen ja lisäksi niillä on soluja, joiden tehtävänä on sekä tukeminen että nesteiden kuljetus (Area ja Popa 2014). Vettä kuljettavat putkilot muodostuvat päästään yhteydessä olevista putkisoluista, jotka ovat prosenkyymisoluja, eli täysikasvuisina kuolleita (Biermann 1996). Yksittäiset putkisolut ovat pituudeltaan välillä 0,1-1,2 mm ja niiden seinämissä on erilaisia huokoisia, joilla ne ovat yhteydessä muihin soluihin (Wiedenhoeft 2010). Putkisoluista muodostuneet putkilot voivat olla pituussuunnassa koko puun mittaisia (Biermann 1996). Putkiloista johtuen lehtipuissa veden kuljetus on tehokkaampaa kuin havupuiden trakeidien (Álen 2009). Biermann (1996) mukaan putkiloiden osuus lehtipuusta vaihtelee riippuen puulajista, esimerkiksi koivuilla noin 10 % ja tammella 40 % on putkisoluja, parenkyymisolujen osuus on 10-35 %. Lehtipuissa on erilaisia parenkyymisoluja, kuten pitkittäistylppysolut eli puutylppysolut, poikittaisseinämäinen pitkittäistylppysolu, sukkulamainen pitkittäistylppysolu ja ydinsäteen tylppysolut (Biermann 1996, Kärkkäinen 2003).

Lehtipuissa on kahdentyyppisiä kuituja, kuitutrakeideja ja libriformsoluja, eli puusyitä, joiden osuus riippuen lajista on 40-80 % (Area ja Popa 2014). Wiedenhoeft (2010) mukaan lehtipuukuitujen pääsääntöinen tehtävä on mekaaninen tukeminen. Kuidut ovat lyhyempiä kuin havupuun kuidut ja voivat olla vain 0,2 mm pitkiä (Wiedenhoeft 2010). Libriformsolut ovat kapeita kuituja, joilla on yksinkertaiset huokokset, kuitutrakeidit ovat ohutseinäisempiä ja lyhyempiä kuin libriformsolut (Henriksson ym. 2009). Osassa lehtipuita esiintyy lisäksi vähäisiä määriä trakeideja, jotka voidaan jakaa putkilokeskeisiin ja putkilomaisiin trakeideihin (Kärkkäinen 2003). Putkilomaisia trakeideja esiintyy kouvussa ja poppelissa ja putkilokeskeisiä tammessa (Henriksson ym. 2009).

Patt ym. (2006) mukaan eukalyptus on nopeasti kasvava laji, jota käytetään pääasiassa sellu ja paperiteollisuuden raaka-aineena. Nopeakasvuisuuden lisäksi eukalyptuksen massansaanto on korkea, joten se on halpa raaka-aine, mutta sillä on myös hyvät tekniset

ominaisuudet (Patt ym. 2006). Koivu on käytetyin lehtipuu sellu- ja paperiteollisuudessa Pohjoismaissa. (Henriksson 2009). Koivulla on pidemmät kuidut kuin eukalyptuksella, mutta eukalyptuksen selluloosapitoisuus on korkeampi kuin koivun (Taulukko 1). Koivulla on korkeampi hemiselluloosapitoisuus kuin eukalyptuksella, mutta ligniinipitoisuus voi olla eukalyptuksella korkeampi kuin koivulla (Taulukko 2). Koivulla on pituuteensa nähden ohutseinäisemmät kuidut verrattuna eukalyptukseen, mikä auttaa kuitusidosten muodostuksessa (Häggblom-Ahnger ja Komulainen 2006).

2.5 Muut luonnonkuitukomposiiteissa käytetyt kasvikuidut

Erilaisia luonnonkuituja on laaja valikoima ja Bismarck ym. (2005) jakaa luonnonkuidut varsi-, niini-, siemen-, lehti-, hedelmä- ja ruokokuituihin, kuten luvussa 2.1 on esitetty. Winandy ym. (2008) mukaan muilla luonnonkuiduilla, verrattuna puukuituihin, on alhaisempi tiheys, alhaisempi ligniinipitoisuus ja ne ovat taipuisampia. Monilla kasvikuiduilla käyttöä kuitenkin rajoittaa vakiintuneiden toimitusjärjestelmien puute, prosessilämpötilan rajoitteet ja tuotantomahdollisuuksien iso vaihtelu (Winandy ym. 2008). Verrattuna puukuituihin monet muut kasvikuidut ovat pidempiä, mutta niiden dimensiot vaihtelevat enemmän (Amaducci ja Gusovius 2010). Luonnonkuiduilla on kuitenkin monia hyviä ominaisuuksia, kuten korkea selluloosapitoisuus (Taulukko 3).

2.5.1 Niinikuidut

Niinikuidut ovat varren nilakerroksessa sijaitsevia, pääasiassa mekaanista tukea antavia soluja, joita esiintyy yleensä kuitukimppuina kaksisirkkaisten kasvien varressa (McDougall ym. 1993). Niinikuituja ovat esimerkiksi pellava, hamppu, juutti, kenaf ja rami (Pandey ym. 2010). Niinikuiduista saadaan liottamalla yksittäisiä kuituja tai kuitukimppuja suhteellisen alhaisilla kustannuksilla (Bismarck ym. 2005). Akin (2010) mukaan kirjallisuudessa on määritelty niinikuitujen mikrofibrillikulman olevan pääsääntöisesti alle 10°. Puukuituihin verrattuna niinikuidut pysyvät elossa pidempään ja kuituseinän paksuus kasvaa useasti niin pitkään, että lumen häviää melkein kokonaan (Akin 2010). Niinikuiduilla on korkea selluloosapitoisuus ja alhainen ligniinipitoisuus (Bismarck ym. 2005).

Taulukko 3. Luonnonkuitujen kemiallisia koostumuksia ja dimensioita.

Kuitu	Selluloosa (m-%) ⁽¹⁾	Hemiselluloosa (m-%) ⁽¹⁾	Ligniini (m-%) ⁽¹⁾	Pituus (mm) ⁽²⁾	Leveys (µm) ⁽²⁾	MFA° ⁽¹⁾
Pellava	71	15	2	33	19	5-10
Hamppu	70-74	20	5	25	25	2-6
Juutti	61-72	13-20	12	2	20	8
Rami	68-76	13-16	0,7	120	50	7,5
Sisal	68-78	10-14	10-14	3	20	10-22
PALF	70-82	-	5-12	3-9	6	14
Manila	56-63	-	13	4-6	17-21	-
Öljypalmu	65	-	19	-	-	42
Puuvilla	85-90	5,7	-	15-56	12-35	-
Kookos	36-43	< 1	41-45	1	10-20	43
Vehnä varsikuitu ⁽³⁾	29-40	16-28	15-21	1,5	15	-
Maissi varsikuitu ⁽³⁾	33	20-27	15-14	1-1,5	20	-
Riisi varsikuitu ⁽³⁾	41-57	33	8-19	1,4	8	-
Bagassi	32-48	-	19-24	1,7	20	-
Bambu	60 ⁽⁴⁾	-	32 ⁽⁴⁾	2	15	2-10 ⁽⁴⁾

1) Bismarck ym. 2005

2) Rowell 2008

3) Stokke ym. 2014

4) Jain ym. 1992

Pellava (*Linum usitatissimum* L) on yksi vanhimmista hyödynnetyistä luonnonkuiduista, se on yksivuotinen kasvi, jota kasvatetaan muun muassa Kiinassa ja Ranskassa (Rowell 2008). Pellavakuitu on pitkä, sillä on alhainen mikrofibrillikulma ja korkea selluloosapitoisuus sekä alhainen ligniinipitoisuus (Bismarck ym. 2005). Pellavakuidut ovat ryhmityneet kuitukimpuiksi, ne ovat sileitä, kiiltäviä ja hyvin heterogeenisiä pituudessa, halkaisijassa ja selluloosapitoisuudessa (Kozłowski ym. 2012). Pellavakuidun hajoamislämpötila on yli 200 °C, ne ovat erittäin lujia ja taipuisia, mutta suhteellisen kalliita johtuen työvoimavaltaisesta tuotannosta (Bismarck ym. 2005). Kozłowski ym. (2012) mukaan pellavakuitua on yhä enemmän käytetty kankaiden lisäksi komposiiteissa rakennusmateriaaleina ja autoteollisuudessa. Pellavakuidun kysyntää on kasvattanut myös tuotantoprosessien ja toimitusketjun kehittyminen (Kozłowski ym. 2012).

Juutti kuuluu (*Corchorus*) kasvisukuun ja se on yksi halvimmista luonnonkuiduista, tuotantomäärällisesti se on toiseksi suurin puuvillan jälkeen (Rowell 2008). Juutti on monikäyttöinen, sillä on hyvä lämmön- ja palonkestävyys, mutta auringonvalo heikentää

kuidun vetolujuutta ja sillä on huono kosteuden- ja kemikaalienkestävyys (Bismarck ym. 2005). Juuttikuidut ovat suhteellisen lyhyitä, mutta ne muodostavat kuitukimppuja, jotka voivat olla jopa 4 m pitkiä (Rowell 2008). Juuttikuidulla on hyvä selluloosapitoisuus, alhainen mikrofibrillikulma ja hyvä pituuden ja halkaisijan suhde (Roy ja Lufta 2012). Juuttikuitu on väriltään ruskea, se on luja, mutta hauras, jonka korkea ligniinipitoisuus aiheuttaa ja sillä on huono murtovenymä (Bismarck ym. 2005). Roy ja Lufta (2012) mukaan korkea vetolujuus, alhainen murtovenymä, alhaiset valmistuskustannukset ja kuidun hyvä saatavuus tekevät juutista hyvän pakkausmateriaalin ja sitä onkin perinteisesti käytetty säkkikankaan valmistuksessa. Rahman (2010) mukaan tärkeä läpimurto juuttikuidun käytössä tapahtui, kun sitä alettiin käyttämään sellu ja paperiteollisuudessa sekä luonnonkuitukomposiiteissa autoteollisuudessa. Juutin viljely on työvoimavaltaista, mutta se vaatii vain vähäisiä määriä muuta panosta, kuten lannoitusta ja tuholaismyrkyä (Rahman 2010).

Hamppu (*cannabis sativa*) on yksivuotinen kasvi ja sitä voidaan kasvattaa laajalla alueella, sekä trooppisessa ilmastossa että pohjoisilla leveysasteilla (Amaducci ja Gusovius 2010). Rowell (2008) mukaan hamppua kasvatetaan teollisuuden käyttöön muun muassa Euroopassa, Kanadassa ja Kiinassa. Se on suosittu kuitukasvi, koska se kasvaa nopeasti ja tuottaa erittäin lujaa niinikuitua (Rowell 2008). Hamppukuidut ovat paksuseinäisiä ja niillä on korkea selluloosapitoisuus sekä alhainen ligniinin määrä (Bismarck ym. 2005). Hampun niinikuidut ovat pitkiä, mutta pituus voi vaihdella välillä 5-55 mm (Rowell 2008). Kuiduilla on hyvä kosteudenkestävyys ja korkea vetolujuus, mutta huono murtovenymän (Bismarck ym. 2005). Amaducci ja Gusovius (2010) mukaan hamppukuidun käytössä on ollut ongelmana valmistukselliset haasteet, kuten tuotantoketjun oikeanlaiset laitteet ja prosessit sekä laadun säilyttäminen kuidun erotuksessa, mutta näitä teknologioita on saatu kehitettyä parempaan suuntaan. Perinteisesti hamppukuitua on käytetty köyssissä ja paperin valmistuksessa, mutta nykyisin hamppukuitua käytetään useissa teollisuuden tuotteissa, kuten komposiiteissa rakennusmateriaalina ja autoteollisuudessa (Amaducci ja Gusovius 2010).

Rami (*Boehmeria nivea*) on nopeasti kasvava, alkuperältään Aasiasta oleva kasvi, jonka sato voidaan korjata jopa kuusi kertaa vuodessa (Bismarck ym. 2005). Kuidut ovat erittäin vahvoja ja pitkiä, vaihdellen välillä 60-250 mm (Rowell 2008). Roy ja Lufta (2012b) mukaan kuituseinä on paksu ja vetomurtolujuus on hyvin korkea, kuidut ovat kiiltäviä ja

vaaleita väriltään, mutta ne ovat hauraita, joustamattomia ja niillä on alhainen hankauskestävyys. Ramikuidulla on korkea pituuden ja leveyden suhde (3500), korkea selluloosapitoisuus ja hyvin vähän ligniiniä ja hemiselluloosaa (Roy ja Lufta 2012b). Hyvien ominaisuuksien ansioista ramikuitu soveltuu hyvin lujitteeksi komposiitteihin (Bismarck ym. 2005). Ramikuidun pääkäyttö on ollut tekstiileissä, mutta nykyisin sitä käytetään esimerkiksi autoteollisuuden komposiiteissa (Roy ja Lufta 2012b).

2.5.2 Lehtikuidut

Lehtikuituihin kuuluu muun muassa sisal, ananaksen lehtikuitu PALF, manilahamppukuitu ja heneque. Ananas (Pineapple Leaf Fibre PALF), (*Ananas comosus*) on monivuotinen kasvi, jonka lehtikuidut ovat lujia ja jäykkiä (Rowell 2008). Ananaksen lehtikuidulla on korkea selluloosapitoisuus ja korkea pituuden ja leveyden suhde (450) (Mukherjee ja Satyanarayana 1986). Ananaskuitua on runsaasti saatavilla ja kuidut ovat sivutuote ananaksen viljelystä, joten sen kustannukset ovat alhaiset (Bledzki 2002). PALF on erittäin hygroskooppinen, korkealaatuinen ja sen hyvät mekaaniset ominaisuudet johtuvat korkeasta selluloosapitoisuudesta ja suhteellisen matalasta mikrofibrillikulmasta (Bismarck ym. 2005).

Sisal (*Agave sisalana*) on monivuotinen kasvi alkuperäisin Meksikosta ja Väli-Amerikasta, mutta kuidun tuotanto tapahtuu pääasiassa Tansaniassa ja Brasiliassa (Bismarck ym. 2005). Sisal lehtikuidut ovat lyhyitä, mutta muodostavat pitkiä kuitukimppuja, jopa 1 m pitkiä (Anandjiwala ja John 2010). Sisalkuidulla on korkea selluloosapitoisuus, se on väriltään kellertävä ja sileä kuitu (Bismarck ym. 2005). Sisal on eniten käytetty lehtikuitu ja nykyisin sitä käytetään sellu ja paperiteollisuudessa ja luonnonkuitukomposiiteissa, muun muassa autoteollisuudessa ja rakennusmateriaaleina (Anandjiwala ja John 2010). Kuidun vetolujuus ja kimmomoduuli heikkenevät lämpötilan kasvaessa ja kuidut hajoavat suolavedessä (Bismarck ym. 2005).

Manilla (*Musa textilis N'ee*) on alkuperältään Filippiineiltä, jossa on myös suurin tuotanto, se on yksi lujimmista kasvikuuduista (Bismarck ym. 2005). Manillakuitua käytetään muun muassa tekstiileissä ja sellunvalmistuksessa, mutta kuidun valmistus on hyvin työvoimavaltaista ja tuotantoprosessia ja laitteita on kehitettävä, jotta kuitua voidaan käyttää enemmän määrin esimerkiksi komposiittien vahvikkeena (Göltenboth ja Mühlbauer

2010). Kuitu on sileä ja kiiltävä, väriltään vaalean kellertävä ja se kestää suolavettä paremmin kuin useammat luonnonkuidut (Bismarck ym. 2005).

Öljypalmu (*Elaeis guineensis*) on monivuotinen ja monikäyttöinen kasvi, josta valmistetaan pääasiassa palmuöljyä, mutta jota voidaan käyttää myös esimerkiksi ruokakasvina ja lääkkeissä (Bismarck ym. 2005). Khalil ym. (2008) mukaan öljypalmun viljelystä muodostuu paljon kuitupitoista jätettä, joista suurin osa poltetaan peloilla aiheuttaen ympäristöongelmia. Vain pieni osa jätteestä otetaan hyötykäyttöön (Khalil ym. 2008). (Bismarck ym. 2005) mukaan öljypalmun kuidut ovat hyvin huokoisia ja niiden mitat vaihtelevat suuresti, ne ovat hyvin taipuisia, mutta niillä on heikompi vetolujuus kuin muilla kasvikuiduilla. Öljypalmukuitujen mikrofibrillikulma on suurempi verrattaessa useampaan luonnonkuituun (Bismarck ym. 2005). Öljypalmukuidun käyttökohteita on kehitetty ja käyttöä laajennettu muun muassa komposiitteihin sekä sellu ja paperiteollisuuteen, mutta jotta öljypalmukuidun käyttöä voitaisiin täysin hyödyntää uusissa tuotteissa, tarvitaan lisää tutkimuksia (Khalil ym. 2008).

2.5.3 Siemenkuidut

Puuvilla on tärkein sekä käytetyin siemenkuiduista, toinen hyödynnetty kasvi on kapokki (McDougall ym. 1993). Puuvillan, yleisimmin hyödynnetty lajike on *G.hirsutum*, jonka osuus puuvillakuidun tuotannosta on yli 80 % (Bismarck ym. 2005). Puuvillakuitu sisältä hyvin puhdasta selluloosaa ja sitä saadaan siemenkodan siemenhahtuvista (McDougall ym. 1993). Kuidun selluloosapitoisuus on korkea, jopa 90% (Dochia ym. 2012). Puuvillakuitu ei sisällä ligniiniä ja hemiselluloosapitoisuus on myös alhainen (Bismarck ym. 2005). Puuvillakuitu on luja johtuen korkeasta fibrillaarisesta rakenteesta ja kristalliinisuudesta (Dochia ym. 2012). Kuidun märkävetoisuus on korkeampi kuin kuivana ja sillä on parempi murtovenymä ja elastinen palautuminen kuin hamppukuidulla (Bismarck ym. 2005). Dochia ym. (2012) mukaan puuvillan kasvatuksessa ja tuotannossa on lähiaikoina siirrytty ympäristöystävällisempiin teknologioihin, mutta edelleen tärkeinä kehityskohteina on vähentää lannoitusta ja muita kemikaaleja sekä pienentää ympäristövaikutuksia. Tärkeää on myös löytää kuidulle uusia sovelluskohteita ja alentaa tuotannon kustannuksia (Dochia ym. 2012).

2.5.4 Hedelmäkuidut

Kookoskuitua saadaan kookospalmun hedelmän kuoresta, joka on elintarviketuotannon sivutuote (Rowell ym. 2008). Kookoskuitu on yksi sitkeimmistä kasvikuiduista, ne ovat lyhyitä ja paksuseinäisiä sekä hyvin kulutusta kestäviä (Bismarck ym. 2005). Kookoskuidulla on korkea ligniinipitoisuus ja alhainen selluloosaosuus (Mohanty ym. 2000). Verrattuna muihin luonnonkuituihin kookoskuidulla on keskitason lujuus, mutta hyvät venymä- ja kutistumisominaisuudet (Jayasekara ja Amarasinghe 2010). Kookoskuidun vetolujuus on luonnonkuiduista alhaisin, joka johtuu alhaisesta selluloosapitoisuudesta ja korkeasta mikrofibrillikulmasta (Mohanty ym. 2000). Jayasekara ja Amarasinghe (2010) määrittelee kookoskuidun olevan huokoinen, viskoelastinen, karkea ja kestävä, sillä on hyvät akustiset ominaisuudet ja värjättyvyys sekä erittäin hyvä meriveden kestävyys. Kookoskuitu on monikäyttöinen, saatavilla läpi vuoden ja sen kustannukset ovat alhaiset verrattuna muihin luonnonkuituihin siksi kookoskuidun käyttöä onkin lähiaikoina pyritty kehittämään monipuolisemmaksi, kuten luonnonkuitukomposiitteihin (Jayasekara ja Amarasinghe 2010).

2.5.5 Varsikuidut

Bismarck ym. (2005) mukaan varsikuituihin kuuluu muun muassa riisi, vehnä, kaura, ohra, ruis ja maissi, mutta luokittelu vaihtelee eri lähteissä. Viljelyn sivutuotteena syntyy isoja määriä kuituista biomassaa, jota voitaisiin hyödyntää erilaisissa tuotteissa, mutta useasti jätetään sadonkorjuun jälkeen maahan tai poltetaan (Bismarck ym. 2005). Vehnän ja maissin selluloosapitoisuudet ovat alhaisemmat kuin riisin varsikuidulla, mutta riisin varsikuidut ovat pienempiä verrattaessa vehnän ja maissin varsikuituihin (Rowell 2008, Stokke ym. 2014). Varsikuidulla selluloosapitoisuus vaihtelee välillä 38-45 %, hemiselluloosaa on 15-31 % ja ligniiniä 12-20 % (Bismarck ym. 2005). Verrattuna muihin kasvikuituihin varsikuiduilla on alhaisempi veto- ja puristuslujuus, mutta niillä on useita hyviä ominaisuuksia verrattaessa mineraalilujitteisiin (Bismarck ym. 2005). Varsikuituja viljan sivutuotteena on paljon saatavilla, ne ovat ympäristöystävällisiä ja edullisia, oikeanlaisella käytöllä niitä voidaan hyödyntää halpana teknisenä materiaalina ja samalla auttaa jätteiden hallinnassa (Bledzki ym. 2010).

2.5.6 Ruoko- ja ruohokuidut

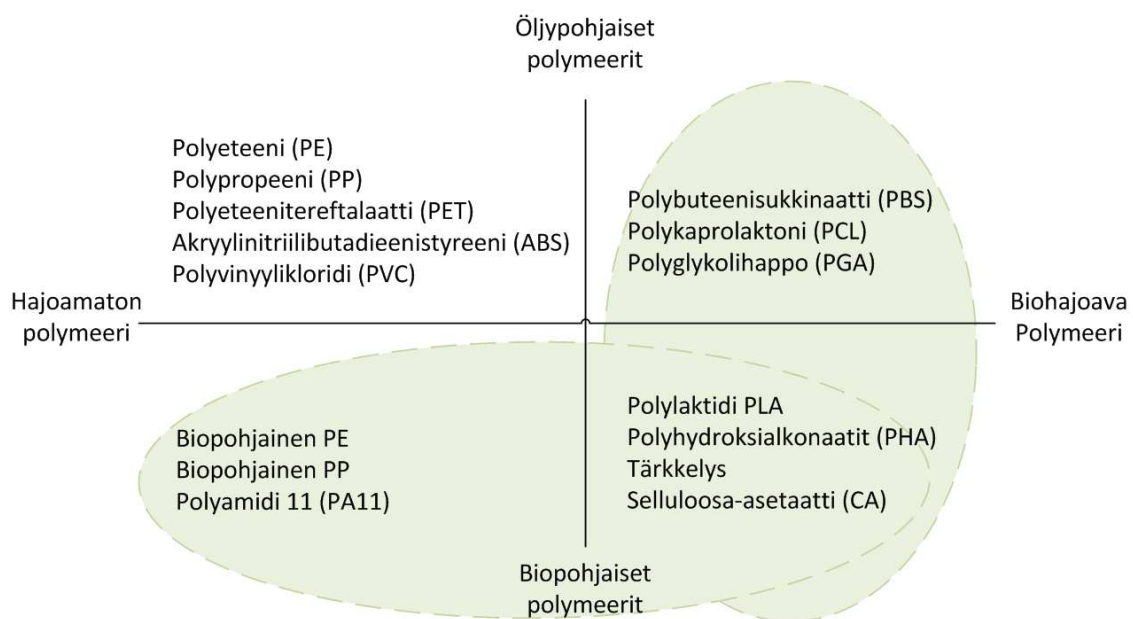
Ruoko- ja ruohokuitukasveihin kuuluu muun muassa bambu, bagassi eli sokeriruoko, esparto-heinä ja järviruoko (Bismarck ym. 2005). Bagassi on sokeriruoko'on tuotannossa syntyvää puristusjätettä, jota käytetään muun muassa paperinvalmistuksessa ja komposiiteissa (Rowell 2008). Huda ym. (2012) mukaan bambukuidulla on korkea mekaaninen lujuus ja alhainen tiheys. Verrattaessa puukuituun bambulla on korkeampi pituuden ja leveyden suhde ja kuidut ovat 10 kertaa halvempia kuin lasikuitu (Huda ym. 2012). Bambukuidulla on hyvä vetolujuus, johon vaikuttaa suhteellisen korkea selluloosapitoisuus ja alhainen mikrofibrillikulma (Jain ym. 1992). Bambukuidut ovat pitkiä, ohuita ja paksuseinäisiä (Rowell 2008). Bambukuidulla on alhainen tiheys ja tämän takia siitä saadaankin erittäin kevyitä komposiitteja muun muassa autoteollisuuden käyttöön (Huda ym. 2012). Bambukuidulla on korkeampi selluloosapitoisuus kuin bagassilla, mutta huomattavasti korkeampi ligniinipitoisuus (Taulukko 3).

3. MATRIISIPOLYMEERIT

3.1 Matriisi

Matriisi sitoo komposiitin materiaalit yhteen, muovikomposiiteissa matriisina toimii muovi, eli polymeeri (Saarela ym. 2007). Rana ja Bandyopadhyay (2013) mukaan muovit voidaan jakaa kesto- ja kertamuoveihin. Kestomuovin molekyyliden välillä ei ole kemiallisia sidoksia, toisin kuin kertamuovien välillä, joita ei voida kovettumisen jälkeen enää uudelleen sulattaa ja käyttää (Rana ja Bandyopadhyay 2013). Luonnonkuitukomposiiteissa matriisi voi olla kesto- tai kertamuovia, ja sen tehtävänä on suojata kuituja mekaaniselta kulumiselta ja siirtää kuorma kuiduille (Pickering ym. 2016). Rana ja Bandyopadhyay (2013) määrittää kestopuovin uudelleenkäytön perustuvan molekyylisidoksiin, jotka pitävät muovin yhdessä. Molekyylisidokset heikkenevät, kun muovia lämmitetään ja vahvistuvat kun muovi jäähtyy ja tämän takia kestopuovia voidaan sulattaa ja muovata uudestaan (Rana ja Bandyopadhyay 2013).

Matriisipolymeerin oleellisia valintaperusteita ovat hinta, käyttöominaisuudet, matriisin lopputuotteen mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät, kuten muovin tarttuvuus lujitteisiin, sekä lämmönkestävyys ja kemiallinen kestävyys (Saarela ym. 2007). Pickering ym. (2016) mukaan luonnonkuitut ovat termisesti epästabiileja yli 200 °C lämpötilassa, joten tärkeä luonnonkuitukomposiittien matriisin valintaan vaikuttava tekijä on prosessointilämpötila. Lämpötilarajoitteen takia voidaan käyttää vain polymeerejä jotka pehmenevät alle 200 °C (Mohanty ym. 2000). Kestomuoveissa näitä polymeerejä ovat muun muassa polypropeeni (PP) ja polyeteeni (PE), jotka ovat eniten käytettyjä polymeerejä luonnonkuitukomposiiteissa (Pickering ym. 2016). Öljypohjaiset polymeerit hallitsevat muovituotteita, joihin myös PP ja PE kuuluvat (Thakur ym. 2013). Öljypohjaisille polymeereille on yritetty löytää vaihtoehtoisia matriiseja ja tämän takia biopohjaiset polymeerit uusiutuvasta materiaalista ovat herättäneet kiinnostuksen (Faruk ym. 2012). Biopohjaisista polymeereistä polylaktidilla (PLA) on suotuisat mekaaniset ominaisuudet verrattaessa esimerkiksi polypropeeniin (Pickering ym. 2016).



Kuva 5. Polymeerien jaottelua, vihreällä alueella biopolymeerit (Zini ja Scandola 2011).

3.2 Biopolymeerit

Ilmaston lämpenemisestä johtuva ympäristötilanne on suunnannut huomioon materiaalien kestävään käyttöön ja tämän takia halutaan käyttää järkevästi rajoitettuja resursseja, kuten energialähteitä (Niaounakis 2013). Lisäksi raakaöljyn hinta on noussut, joten biopolymeerit ovat kilpailukykyisempiä kuin aikaisemmin (Faruk ym. 2014). Niaounakis (2013)

mukaan biopolymeerit voidaan lajitella biohajoaviin eli luonnossa hajoaviin ja biohajoamattomiin eli luonnossa hajoamattomiin. Toinen lajittelutapa perustuu biopolymeerin alkuperään, jolloin ne jaetaan biopohjaisiin ja raakaöljypohjaisiin (Kuva 5).

Niaounakis (2013) mukaan polymeeri voidaan määritellä biopolymeeriksi, jos se on biopohjainen tai biohajoava, tai molempia. Biopohjainen polymeeri on tuotettu uusiutuvasta luonnon raaka-aineista (Niaounakis 2013). Kaikki biopohjaiset polymeerit eivät ole biohajoavia ja kaikki biohajoavat polymeerit eivät ole biopohjaisia (Johnson ym. 2003). Biohajoava tarkoittaa polymeerin hajoamista biologisessa ympäristössä tietyn ajan kuluessa, mutta raaka-aine voi olla joko uusiutuva tai raakaöljypohjaista (Niaounakis 2013). Sapan ym. (2015) määrittää biohajoamisen riippuvan kosteudesta, lämpötilasta, mikrobeista ja mikrobien määrästä. Oikeanlaisessa ympäristössä polymeeri hajoaa hiilidioksidiksi, vedeksi ja biomassaksi (Sapan ym. 2015). Mohanty ym. (2000) mukaan biohajoavat polymeerit tarjoavat mahdollisuuden jäteongelman ratkaisuun, jonka öljypohjaiset polymeerit ovat aiheuttaneet. Haasteena on löytää oikeat materiaalit ja ratkaisut riittävän suuriin biopolymeerien määriin, jotta saadaan kustannuksia alas ja biohajoavat polymeerit pystyisivät kilpailemaan markkinoilla (Mohanty ym. 2000). Biopolymeerien haasteina ovat kustannusten alentamisen lisäksi saatavuuden ja termomekaanisten ominaisuuksien parantaminen sekä biohajoamisen nopeuttaminen. Pohjimmainen ongelma on saada biopolymeerien ominaisuudet ja prosessoitavuus kilpailevalle tasolle uusiutumattomien polymeerien kanssa (Niaounakis 2013).

Biopohjaisia biopolymeerejä voidaan tuottaa kasveista, eläimistä tai mikrobeista (Niaounakis 2013). Yleisimmin käytetyt biopohjaiset polymeerit luonnonkuitukomposiiteissa ovat tärkkelys, maitohaposta valmistettava polylaktidi (PLA) ja kasviöljyistä valmistettava polyhydroksialkanoaatit (PHA) (Faruk ym. 2014). Biomassan sivutuotteina syntyneet raaka-aineet, kuten tärkkelys ja selluloosa, ovat kiinnostavia korvaajia perinteisille synteettisten polymeerien raaka-aineille, koska ne ovat helposti saatavilla ja halvempia kuin niiden synteettiset korvaajat (Thakur ym. 2013). Uusia biopohjaisia polymeerejä on ollut tarjolla muutaman vuosikymmenen ja niitä on käytetty pääasiassa lääketieteellisiin tarkoituksiin, pakkausmateriaaleihin ja biohajoaviin muovikasseihin, nykyisin myös rakenteelliset materiaalit ovat yleisiä (Bledzki ja Jaszkiwicz 2010). Biopohjaisilla polymeereillä on edelleen paljon kehitysalueita, joista Faruk ym. (2014) on nostanut esiin rajoitetun säilyvyysajan ja alhaisemman käyttöasteen kuin öljypohjaisilla polymeereillä,

lisäksi biopohjaisten polymeerien valmistusprosessi tukeutuu edelleen öljypohjaiseen energiaan ja tuotannon ympäristövaikutukset vaihtelevat. Koska biopohjaisten polymeerien tuotanto on suhteellisen uutta, valmistuksen hinta ei ole yhtä kustannustehokasta kuin fossiilisiin polttoaineisiin pohjautuvien polymeerien, mutta käyttöä ja valmistusta tutkitaan jatkuvasti ja tämä johtaa parannettuihin valmistusmenetelmiin ja tuotteisiin (Faruk ym. 2014).

3.2.1 Polylaktidi

Polylaktidi (PLA) on alifaattinen polyesteri, se on kestopuovi ja sitä valmistetaan pääasiassa uusiutuvasta raaka-aineesta, mutta sitä voidaan valmistaa myös synteettisesti öljystä (Niaounakis 2013). Polylaktidi (PLA) valmistetaan maitohaposta fermentoimalla, eli käymisprosessilla, muun muassa maissista ja sokerijuurikkaasta (Bajpai ym 2014). PLA on biohajoava ja peräisin uusiutuvista luonnonlähteistä (Niaounakis 2013). PLA:n ominaisuudet ovat hyvät verrattuna muihin biopohjaisiin polymeereihin ja se on potentiaalinen vaihtoehto korvaamaan raakaöljypohjaisia muoveja, koska se on luja ja sitä voidaan valmistaa eri menetelmillä, kuten ekstruusiolla ja ruiskuvalulla (Hakkarainen ja Wistrand 2011). PLA tarjoaa komposiittimateriaalina kilpailukykyisen ja CO₂ neutraalin vaihtoehdon polyolefiineille, mutta haasteena on PLA:n huono kuitumatriisi yhteensopivuus sekä kosteusominaisuudet (Virtanen ym. 2016). PLA:lla on suhteellisen hyvä läpinäkyvyys, erinomainen työstettävyys ja säänkestävyys sekä alhainen sulaviskositeetti, joka tarvitaan muottiin puristuksessa (Niaounakis 2013). Hakkarainen ja Wistrand (2011) mukaan polylaktidin haasteina ovat hauraus ja alhainen iskulujuus sekä suhteellisen alhainen lasittumislämpötila (T_g). PLA on myös herkempi kemiallisille ja biologisille hydrolyyseille kuin aromaattiset polyesterit (Hakkarainen ja Wistrand 2011). Polylaktidin lämmönkestävyys on myös heikko (Niaounakis 2013). Bajpai ym. (2014) mukaan PLA:n mekaaniset ominaisuudet ovat vertailtavissa polypropeenin (PP) kanssa, joka on yleisin autoteollisuudessa käytetty polymeeri. Lisäksi PLA:n valmistuslämpötila on sopivan alhainen luonnonkuiduille (Bajpai ym 2014). Polylaktidilla on paremmat mekaaniset ominaisuudet kuin polypropeenilla, kuten vetolujuus ja kimmomoduuli, mutta sillä on alhainen venymä (Taulukko 4).

3.3 Polyolefiinit

Polypropeeni kuuluu polyolefiineihin, samoin kuin polyeteeni (Brydson 1999). Polypropeeni (PP) on polyeteenien (PE) ja PVC:n jälkeen käytetyin muovi (Saarela ym. 2007). Polypropeeni on kehitetty 1950-luvulla ja sen käyttö kasvoi nopeasti yhdeksi valta-muoveista (Brydson 1999). Polypropeeni on kestopuovi ja sitä valmistetaan propeenilla polymeerimalla (Kissel ym.1999). Suurimmat käyttökohteet ovat pakkaukset, auto- ja sähköteollisuuden muoviosat (Saarela 2007). Polypropeenilla on hyvät mekaaniset ja termiset ominaisuudet huoneenlämmössä, sillä on alhainen tiheys, korkea sulamislämpötila ja suhteellisen hyvä iskulujuus (Kissel ym.1999). Polypropeeni matriisi on hydrofobinen, kun taas luonnonkuitut ovat hydrofiilisiä, mikä tuottaa ongelmia kuidun ja matriisin rajapinnan lujuudessa (Rahman 2015). PP on syntetttinen biohajoamaton polymeeri, mutta kestopuovina kierrätettävä, kierrätys tosin heikentää materiaalien mekaanisia ominaisuuksia (Thakur ym. 2013). Peltola ym. (2014) mukaan verrattaessa polylaktidia ja polypropeenilla, on PLA ominaisuuksiltaan jäykempi korkeammalla vetolujuudella, mutta sillä on suhteellisen alhainen iskulujuus. PP taas on joustavampi materiaali ja sillä on hyvä venyvyys, mutta alhainen jäykkyys (Peltola ym. 2014)

4. LUONNONKUITUKOMPOSIITIT

Komposiitit rakentuvat kahdesta tai useammasta toisiinsa liukenemattomista materiaaleista, joista yhtenä komponenttina on matriisi, muita ainesosia ovat lujitteet sekä täyte- ja apuaineet (Saarela ym. 2007). Matriisi antaa komposiitille sen muodon ja yleisen kestävyden, kun taas kuituvahvistet antaa jäykkyyden ja lujuuden ja kantaa rakenteellisen kuorman (Sreekumar ja Thomas 2008). Luonnonkuitukomposiitit eli biokomposiitit valmistetaan polymeeristä ja luonnonkuidusta ja niistä käytetään useasti kirjallisuudessa nimeä ”green composites” jos ne on valmistettu biopohjaisesta polymeeristä ja luonnonkuidusta (Mohanty ym. 2005). Luonnonkuitukomposiittien kiinnostus on kasvanut paljon viime vuosina johtuen sen ympäristöystävällisyydestä, kustannustehokkuudesta, biohajoavuudesta ja teknisistä ominaisuuksista (Sreekumar ja Thomas 2008). Tässä luvussa keskitytään luonnonkuitukomposiitteihin, niiden ominaisuuksiin ja tarkastellaan

luonnonkuitujen käyttöä komposiiteissa sekä luonnonkuitukomposiittien eri käyttökoh-
teita ja mahdollisuuksia.

4.1 Luonnonkuitujen käyttö komposiiteissa

Silva ym. (2015) mukaan luonnonkuitukomposiittien ominaisuuksiin vaikuttaa kompo-
siittien materiaalien ominaisuudet sekä materiaalien rajapinnan ominaisuudet. Käytettä-
essä luonnonkuituja komposiittien lujitteena on oltava tietoisia kuitujen ominaisuuksista
ja käyttäytymisestä, jotta voidaan valita oikeat lujitteet tarvittavaan käyttötarkoitukseen
(Silva ym. 2015). Joffe ja Andersons (2014) määrittää, että luonnonkuitujen ominaisuuksista
olisi tarpeellista tietää jäykkyys, lujuus ja murtovenymä sekä mitat, kuten pituus ja
halkaisija. Oleellisin tieto liittyen luonnonkuitukomposiittien kantavaan rakenteeseen on
kuitujen lujuuden lisäksi kuitujen ja niitä ympäröivän matriisin adheesio, eli rajapinnan
tartuntakyky sekä rajapinnan lujuus (Joffe ja Andersons 2014). Kuitujen pitää olla kun-
nolla kostuneet muoviin, jotta saadaan hyvä kuidun ja matriisin rajapinnan adheesio ja
lujuus (Bledzki ym.1996). Kuitu-matriisi rajapinnan tartuntakyky ja lujuus vaikuttavat
komposiitin veto- ja taivutuslujuuksiin (Grozdanov ym. 2015). Kuitujen kostumiseen vai-
kuttaa polymeerin viskositeetti ja materiaalien pintajännitys (Bledzki ym.1996). Lisäksi
kuitujen pinnanominaisuudet ovat tärkeät määritettäessä luonnonkuitujen kostumista po-
lymeeriin (Godavarti 2005). Kuidun kemialliset ja mekaaniset ominaisuudet, kuten kui-
tujen rakenne, selluloosapitoisuus, fibrillikulma ja polymeroitumisaste, vaikuttavat suo-
raan biokomposiitin rakenteeseen (Silva ym. 2015). Lisäksi kuitujen dimensiot, laatuvi-
heet sekä kuidun ja polymeeri keskinäinen yhteensopivuus ovat tärkeitä vaikuttajia (Fa-
ruk ym. 2012). Komposiitin lujitteiden tärkeimpiä mekaanisia ominaisuuksia ovat kim-
momoduuli ja vetolujuus (Saarela ym. 2007). Luonnonkuiduilla on korkeampi vetolujuus
ja kimmomoduuli kuin polymeerillä, joten lisättäessä kuitua muoviin, saadaan korkeam-
mat mekaaniset ominaisuudet (Ku ym. 2011). Luonnonkuidun lujiteominaisuus perustuu
selluloosaan ja sen kristalliinisuuteen (Silva ym. 2015).

Taulukko 4. Luonnonkuitujen, PP:n ja PLA:n mekaanisia ominaisuuksia.

Kuitu	Tiheys (g/cm ³) ⁽¹⁾	Venymä (%) ⁽¹⁾	Lujuus (MPa) ⁽¹⁾	Kimmomoduuli (GPa) ⁽¹⁾
Pellava	1,5	2,7–3,2	500-1500	78
Hamppu	1,5	3	690	70
Juutti	1,3	1,5-1,8	393–773	27
Rami	1,6	3,7	400–938	61–128
Sisal	1,5	2,0–2,5	511–635	9–22
PALF	1,6	1,6	413-1627	34-82
Puuvilla	1,6	7,5	400	6–13
Kookos	1,2	30	593	4–6
Havupuu ⁽²⁾	1,5		100-170	10–50
Lehtipuu ⁽²⁾	1,5		90-180	10-70
Polypropeeni (PP)	1	15–700	26–41	1–1,8
Polylaktidi (PLA) ⁽³⁾		3,3	64	3,4

1) Ku ym. 2011

2) Peltola ym. 2014

3) Clemons 2008

Kuidun dimensioiden tiedot auttavat vertailemaa eri luonnonkuituja, korkea pituuden ja leveyden suhde on toivottu ja se antaa tietoa luonnonkuidun lujuusominaisuuksista (Faruk ym. 2012). Luonnonkuitujen pituuden ja leveyden suhde vaihtelee välillä 100-3000, minkä takia ne ovat hyviä polymeerikomposiittien lujitteita (Joffe ja Andersons 2014). Godavarti (2005) mukaan puukuiduista havupuita käytetään enemmän luonnonkuitukomposiiteissa kuin lehtipuita ja yksi syy tähän on havupuiden parempi pituuden ja leveyden suhde. Puukuitujen käytössä on tärkeää kontrolloida kuitujen kokojakaumaa, pituuden ja leveyden suhdetta, morfologiaa ja kosteuspitoisuutta. (Godavarti 2005). Madsen ym. (2014) määrittelee kuituorientaatio olevan tärkeä komposiitin ominaisuuksiin vaikuttava tekijä. Parhaimmat mekaaniset komposiittiominaisuudet saadaan, kun kuorma suunnataa kuitujen suuntaisesti (Madsen ym. 2014).

Luonnonkuitujen käytön edut verrattuna perinteisiin lujitemateriaaleihin kuten lasikuituun ovat ympäristöystävällisyyden, biohajoavuuden ja alhaisten kustannusten lisäksi alhainen tiheys, suhteellisen hyvä ominaislujuus, työstölaitteiden vähäinen kuluminen ja alhaiset terveysriskit sekä parannettu energianhyötykäyttö (Mohanty ym. 2000). Silva ym. (2015) määrittää luonnonkuitujen eduksi niiden runsaan saatavuuden ja laajan valikoiman, lisäksi niillä on suhteellisen reaktiivinen pinta, joka auttaa yhdistämistä eri

materiaaleihin. Esimerkiksi komposiitin jäykkyyteen voidaan vaikuttaa parantavasti nostamalla luonnonkuitujen osuutta (Silva ym. 2015). Mohanty ym. (2000) mukaan suurin haaste luonnonkuitujen käytössä komposiittien lujitteena on kuidun hydrofiilisyyden eli vesihakaisuuden, joka aiheuttaa ongelmia polymeerimatriisin yhteensopivuuden kanssa komposiitin valmistuksen aikana. Hydrofiilisyyden vaikuttaa erityisesti komposiittien mekaanisiin ominaisuuksiin (Faruk ym. 2012). Tähän voidaan vaikuttaa käyttämällä kytkeäaineita, kuten silaaneja (Silva ym. 2015). Luonnonkuidun käyttö aiheuttaa myös rajoituksia komposiitin valmistuksen prosessilämpötilassa, suurimmalle osalle luonnonkuiduista prosessointilämpötila rajoittuu 200 asteeseen (Mohanty ym. 2000). Faruk ym. (2012) määrittää luonnonkuitujen ominaisuuksien suuren vaihtelun olevan yksi luonnonkuitujen haasteista, verrattaessa lasikuidun käyttöön komposiiteissa. Vaihtelu luonnonkuidun ominaisuuksissa johtuu kuidun rakenteen eroavuuksista, mihin vaikuttaa yleisesti kuitulähteen kasvu- ja ympäristöolosuhteet (Faruk ym. 2012). Vaikka luonnonkuiduilla on kiinnostavia ominaisuuksia, on luonnonkuitukomposiiteissa isoja puutteita termisissä ja mekaanisissa ominaisuuksissa, lisäksi mikrobien kestävyys ja epätasaisuus kuitujen dimensioissa aiheuttaa ongelmia (Silva ym. 2015).

Joffe ja Andersons (2014) mukaan pellava ja hamppu ovat parhaiten sopivia komposiittien valmistukseen, koska niillä on korkea selluloosapitoisuus, hyvät mekaaniset ominaisuudet ja oikeanlaiset kuitujen dimensiot. On tutkittu, että nämä kuidut pystyvät kilpailemaan lasikuidun kanssa, vaikka niiden lujuus on huomattavasti alhaisempi kuin lasikuidun, mutta alhaisemman tiheyden takia niillä on suotuisa ominaiskimmokerroin (Joffe ja Andersons 2014). Yleensä komposiittien valmistuksessa suositaan pitkiä kuituja, ja Migneault ym. (2008) tutkimuksen mukaan käytettäessä pidempiä kuituja komposiittien mekaaniset ominaisuudet paranevat. Tutkimuksessa tarkasteltiin CTM koivusellun kuidun pituuden vaikutusta seostettuna polyeteeniin (HDPE) (Migneault ym. 2008). Silva ym. (2015) toisaalta määrittää, että käytettäessä puukuituja komposiittien lujitteena, pitäisi suosia lyhyitä ja pieniä kuituja koska ne antavat korkeamman ominaispinta-alan. Pienemmät kuidut levittäytyvät homogeenisemmin ja näin kuitumatriisi yhteensopivuus paranee, myös turpoaminen ja kuitujen katkeamiset prosessoinnin aikana vähenevät (Silva ym. 2015).

Sekä polylaktidin että polypropeenin käyttöä luonnonkuitukomposiiteissa on tutkittu pitkään. Peltola ym (2014) tutkivat puukuiduilla lujitettujen PLA:n ja PP:n ominaisuuksia,

joissa kuituina käytettiin puujauhoa sekä erilaisia mänty-, kuusi-, koivu- ja eukalyptus-sellua. Prambauer ym. (2015) yhdistivät paperiarkkeja ja polypropeenä komposiittilaminatiksi kuumapuristamalla. Tutkimuksessa käytettiin kopiopaperia, suodatinpaperia ja sanomalehtipaperia (Prambauer ym. 2015). Peltola ym. (2014) tutkimuksen mukaan kuitujen lisäys kasvatti vetolujuutta ja jäykkyyttä, mutta iskulujuus pääsääntöisesti laski. Prambauer ym. (2015) tutkimuksessa saatiin kopio- ja sanomalehtipaperilla hyvät mekaaniset ominaisuudet, korkean vetolujuus sekä kimmomoduuli. Tämä osoittaa, että paperiarkeilla muovien lujitteena on hyvät mahdollisuudet (Prambauer ym. 2015).

4.2 Luonnonkuitukomposiittien sovelluksia ja mahdollisuuksia

Luonnonkuitukomposiitteja käytetään koska ne ovat ympäristöystävällisiä, CO neutraaleja ja niillä on hyvät mekaaniset ominaisuudet (Madsen ym. 2014). Luonnonkuitukomposiittien käyttökohteet ovat laajat, vaihdellen biohajoavista kukkaruukuista ja golf tiistä vaativimpiin komponentteihin, kuten huonekaluihin, terassilautoihin ja rakennusmateriaaleihin sekä auton osiin (Graupner ja Müssig 2010). UPM on valmistanut pitkään terassilautoja luonnonkuitukomposiiteista. Komposiittien materiaaleina ovat tarralaminaattituotannon jätteet, eli kierrätetyt selluloosakuidut ja muovit, jotka päätyisivät muuten kaatopaikalle tai jätteenpolttoon (UPM ProFi 2017). Haimi (2017) on ollut kehittämässä suomalaisessa Sulapac Oy:ssä täysin biohajoavaa pakkausmateriaalia puuhakkeesta ja biohajoavasta luonnonperäisestä sidosaineesta. Tuotteelle on kehitetty muovinkaltaiset ominaisuudet ja käyttökohteena on kosmetiikkapakkaukset (Haimi 2017). Luonnonkuitukomposiitteja on käytetty myös leluissa, soittimissa sekä matkapuhelimissa (Zini ja Scandola). Pickering ym. (2016) mukaan urheiluvälineistä esimerkiksi surffilautoissa käytetään luonnonkuitukomposiitteja. Myös lentokoneiden sisäpaneeleissa on otettu käyttöön luonnonkuitukomposiitteja sekä kehitetty luonnonkuitukomposiiteista tuuliturbiinien lapoja (Pickering ym. 2016). Luonnonkuituja on käytetty autoteollisuuden komposiiteissa jo pitkään muun muassa ovipaneeleissa, istuimissa, kojelaudassa, takakontin osissa ja sisäverhoilussa (Faruk ym. 2014).

Tulevaisuudessa luonnonkuitukomposiitteja tullaan käyttämään enemmän rakennusteknisissä ratkaisuissa (Faruk ym. 2014). Graupner ja Müssig (2010) mukaan luonnonkuitukomposiitit ovat kevyitä ja painoonsa nähden lujia, niillä on hyvät jäykkyysominaisuudet ja tämän takia niissä on potentiaalia rakennusteollisuuden käyttöön.

Kimmomoduuli on verrattavissa lasikuitukomposiitteihin ja niillä on hyvät murtumisominaisuudet, ne eivät murtuessaan pirstaloitu ja tee teräviä reunoja niin kuin lasikuitu (Graupner ja Müssig 2010). Jotta luonnonkuitukomposiitit pystyvät kilpailemaan synteettisestä kuidusta valmistettujen komposiittien kanssa, ovat ne riippuvaisia materiaalien ja prosessien kehityksestä (Faruk 2014). Tulevaisuudessa on myös kehitettävä halvempia tuotantotekniikoita biohajoaville matriisimuoveille ja saada prosessit nopeammiksi ja tehokkaiksi (Bajpai 2014). Faruk ym. (2014) mukaan luonnonkuitukomposiitit voisivat olla täysin kierrätettävissä, mutta täysin biopohjaiset ja biohajoavat komposiitit olisivat erittäin herkkiä kosteudelle ja lämpötilalle. Lisäksi haasteena biopohjaisissa ja -hajoavissa komposiiteissa on biopolymeerien korkea hinta (Bajpai 2014). Luonnonkuidut ovat huomattavasti halvempia kuin lasikuidut, mutta hinnanvaihtelu on kuitenkin suurta johtuen eri luonnonkuitujen korjuu ja prosessointikustannuksista (Faruk ym. 2014). Vaikka monia taloudellisia ja teknisiä asioita pitää ratkaista, jotta biopolymeerit voivat korvata synteettiset polymeerit, on biopohjaisilla muoveilla mahdollisuus korvata olemassa olevat polymeerit ja myös kehittää aivan uusia ratkaisuja (Zini ja Scandola 2011). Myös luonnonkuitujen käytössä on paljon kehitettävää, koska tällä hetkellä vain pieni osa luonnonkuiduista on tutkittu ja vielä vähemmän kaupallisesti hyödynnettyjä (Faruk ym. 2014). Luonnonkuitukomposiiteilla on hyvät mahdollisuudet keveinä ja ympäristöystävällisinä tuotteina kun saadaan kehitettyä materiaalien rajapinnan ominaisuuksia sekä mahdollisuutta hyödyntää luonnonkuituja jätteestä (Zini ja Scandola 2011).

5 AINEISTO JA MENETELMÄT

Tutkimuksen tavoitteena on tarkastella kuituominaisuuksien vaikutusta luonnonkuitukomposiittien ominaisuuksiin. Kokeellisen osion tavoitteena on tutkia, saadaanko kuitua ja muovia yhdistettäessä paremmat mekaaniset ominaisuudet kuin erillisinä materiaaleina. Tavoitteena on myös tutkia miten kuidun jauhatus vaikuttaa arkkien ja komposiittien ominaisuuksiin sekä miten kuitulaji vaikuttaa mitattaviin ominaisuuksiin. Polymeereinä vertaillaan polypropeenä (PP) ja polylaktidia (PLA). PLA on biopolymeeri, jolla on hyvät mekaaniset ominaisuudet. Sen käyttöä mahdollisena korvaajana synteettiselle polypropeenille on tutkittu laajasti. Kuitumateriaaleiksi Aalto-yliopistolta saatiin koivu- ja eukalyptussellua. Koivu- ja eukalyptuskuidut ovat hyvin samanlaiset dimensioiltaan ja

monilta ominaisuuksilta, mutta niillä on kuitenkin tiettyjä rakenteellisia ja koostumuksellisia eroja. Kokeellisessa osiossa tarkastellaan lisäksi kuidun jauhatuksen vaikutusta arkkien ja komposiittien ominaisuuksiin. Jauhatuksen tarkoituksena on parantaa kuitujen sitoutumiskykyä ja näin vaikuttaa arkkien ominaisuuksiin. Kokeellisessa osiossa arkeille ja komposiiteille tehdään taivutus- ja vetokoe, sekä tarkastellaan vetokokeen murtumakohdasta optisella mikroskopiolla. Tuloksista saadaan muun muassa vetolujuus, taivutusjäykkyys, murtovenymä sekä kimmomoduuli. Nämä kertovat materiaalien lujuus- ja jäykkysominaisuuksista, joita tässä tutkimuksessa selvitetään. Näytteen valmistuksessa haluttiin käyttää suhteellisen vähän testattua menetelmää ja samalla hahmottaa mahdollisia kehityskohteita.

5.1 Materiaalit

Polymeereinä käytettiin polypropeenaa, Moplen HP2674 ja Ingeo Natureworks 3251D polylaktidia (Taulukko 6). Koivusellu oli Botnia Nordic Birch Aki, ja eukalyptus Cenibra Euca, ECF-valkaistu (Taulukko 5).

Taulukko 5. Kuitumateriaaleina käytettiin Botnia Nordic Birch Aki sellua ja eukalyptusselluna Cenibra Euca

Kuitu	Osuus (%)	Sellu	Kuitupituus (mm)	Vaaleus (%)
Eukalyptus ⁽²⁾		Cenibra Euca, ECF-valkaistu	0,74	89 %
Koivu ⁽¹⁾		Botnia Nordic Birch Aki	< 1,10	89 %
- Koivu (betula verrucosa)	90-100			
- Haapa (populus tremula)	0-10			

1) Botnia Nordic 2017

2) Paltakari 2018

Taulukko 6. Polymeereinä käytettiin polypropeenaa, Moplen HP2674 ja polylaktidia, Ingeo Natureworks 3251D.

Polymeeri	Nimi ja ID	Tiheys (g/cm ³)	Sulamislämpö °C
Polypropeeni ⁽¹⁾	Moplen HP2674	< 1	50 - 170
Polylaktidi ⁽²⁾	Ingeo Natureworks 3251D	1,24	188-210

1) Moplen HP2674 2017

2) Ingeo™ Biopolymer 3251D

5.2 Näytteenvalmistus

Työn kokeellisessa osiossa valmistettiin luonnonkuitukomposiitteja koivu- ja eukalyptuskuiduista yhdistettynä polypropeeniin ja polylaktidiin. Komposiiteista tutkittiin mekaanisia ominaisuuksia sekä tehtiin mikroskooppisia tarkasteluja. Komposiitit koostuivat koivu- ja eukalyptusselluista valmistetuista arkeista, joiden väliin polymeeri lisättiin. Arkkeja valmistettiin kahdesta eri kuidusta ja kahdesta eri jauhatusteesta (Taulukko 7). Koivu- ja eukalyptussellusta valmistetuille koearkeille tehtiin samat mittaukset kuin komposiiteille. Tarkoituksena oli mitata koekappaleista vähintään 5 rinnakkaista tulosta, mutta komposiittien valmistusongelmien takia kaikista yhdistelmistä ei saatu tavoitteellista määrää koekappaleita. Kokeellinen osuus suoritettiin Aalto-yliopiston Biotuotteiden ja biotekniikan laitoksella.

Taulukko 7. Näytekkoodit arkeille ja komposiiteille.

Näytekkoodi	Polymeeri	Kuitu
E0		Eukalyptus jauhamaton
E30		Eukalyptus jauhettu 30 min
E0PP	Polypropeeni	Eukalyptus jauhamaton
E30PP	Polypropeeni	Eukalyptus jauhettu 30 min
E30PLA	Polylaktidi	Eukalyptus jauhettu 30 min
K0		Koivu jauhamaton
K30		Koivu jauhettu 30 min
K0PP	Polypropeeni	Koivu jauhamaton
K30PP	Polypropeeni	Koivu jauhettu 30 min
K30PLA	Polylaktidi	Koivu jauhettu 30 min

5.2.1 Jauhatus

Jauhatuksen tarkoitus on parantaa kuitujen sitoutumiskykyä ja näin vaikuttaa arkkien lujuuteen (Sirviö 2008). Jauhamaton arkki on erittäin huokoista. Jauhatus pienentää huokosten kokoa ja tiivistää arkkiä. Häggblom-Ahnger ja Komulainen (2006) mukaan jauhatuksella saadaan aikaiseksi kuidun ulkoinen fibrillaatio, eli kuidun ulkokerrosten osittainen irtoaminen ja haivettuminen. Ulkoinen fibrillaatio parantaa kuitujen välistä sitoutumista haivenien paremman ulottuvuuden ja pienemmän jäykkyyden ansioista (Häggblom-Ahnger ja Komulainen 2006). Jauhatus aiheuttaa myös hienoaineen syntymistä, eli kuitujen jauhautumista pieniksi partikkeleiksi, joka auttaa kuitusidosten syntymistä

(Sirviö 2008). Jauhatuksen aiheuttama sisäinen fibrilloituminen, eli kuidun notkistumista johtaa laajempaan kontaktipintaan, joka vahvistaa kuitusidoksia (Hägglom-Ahnger ja Komulainen 2006). Ennen jauhatusta selluarkit revittiin pieniksi paloiksi ja liotettiin vedessä yön yli. Sellun jauhatukseen käytettiin Valley Hollanteri jauhinta. Koivu- ja eukalyptussellusta tehtiin kaksi erää, jauhamaton ja jauhettu 30 minuuttia. Kaikki selluerät hajotettiin Valley Hollanterilla ilman painoa 20 minuuttia, jotta kuidut irtoavat toisistaan ennen jauhatusta. Sellujen, joita jauhettiin 30 minuuttia, käsittelyä Valley Hollanteri jauhimella jatkettiin hajottamisen jälkeen lisäämällä jauhimeen kuormituspaino, jolloin jauhatus alkoi. Jauhatus tehtiin ISO 5264-1 standardin mukaisesti. Valley hollanteriin laitettavan massan ja veden kokonaistilavuus oli 23 l, massan määrä 360 g ja jauhettavan massan sakeus 15,7 g/l.

5.2.2 Schopper Riegler-testi

Valley Hollanterin käsittelyn jälkeen jokaisesta erästä otettiin näyte, josta suoritettiin Schopper Riegler -suotautuvuusmittaus. Schopper Riegler- luku (SR-luku) kuvaa massan jauhautuneisuutta ja ilmaisee massan hienousasteen (Hägglom-Ahnger ja Komulainen 2006). SR-luvulla määritetään sellun suotautumisvastus ja testi mittaa, kuinka nopeasti vesi poistuu tai suotautuu kuidusta (Sirviö 2008). SR-luku kasvaa sellun jauhautuessa. Jokaisesta erästä otettiin kaksi näytettä, joista SR-luku mitattiin. Mittaustuloksina käytettiin lukujen keskiarvoa. SR-luku mitattiin 1 litrasta massasulppua, jonka sakeus on 2 g/l. SR-testin jälkeen kuitukakku irrotettiin vedenpoistokammion viiralta vesisuhkupumpulla toimivalla imulaitteella, kuivattiin Lorentzen & Wettre pikakuivaimella ja punnittiin. SR-testit suoritettiin ISO 5267-1 standardin mukaisesti. Tulosten perusteella suoritettiin sulpusakeuden korjaus. SR-luvun mittauksessa käytettiin laimennusvetenä vesijohtovettä.

5.2.3 Arkkien valmistus

Arkkeja valmistettiin jokaisesta massasta käyttäen kahta tavoiteneliömassaa. Komposiitien vertailuun käytettävien arkkien tavoiteneliömassa oli 75 g/m² ja tarvittava määrä 6 kpl/massaerä. Sulput laimennettiin oikeaan sakeuteen perustuen tavoiteneliömassaan. Laimennetun sulpun tarve oli 1 litra arkkiä kohden. Arkkit valmistettiin Lorentzen & Wettre arkkimuotilla ISO 5269 standardin mukaisesti. Tämän jälkeen arkkit

märkäpuristettiin imukartioiden kanssa L&W puristimella 4 minuuttia 360 kPa puristus-paineella. Lopuksi arkit kuivatettiin L&W rumpukuivaimella 2 h 30 min, 65 °C.

5.2.4 Komposiittien valmistus

Komposiitit valmistettiin kolmesta paperiarkista, joiden väliin lisättiin polymeeriä. Kuitujen ja muovin seossuhde oli 50:50. Komposiittien valmistuksessa käytettävien arkkien tavoiteneliömassa oli 30 g/m² ja arkkeja tarvittiin 3 kpl per komposiitti (0,82 g/arkki). Jokaisesta selluerästä ja polypropeenista valmistettiin 2 komposiittia. Kahden ensimmäisen komposiitin arkit kuivatettiin valmistuksen ja märkäpuristuksen jälkeen rumpukuivaimella 20 min, 65 °C. Tämän jälkeen arkki asetettiin alustan kanssa vaa'alle, joka nollattiin (Kuva 6). Puolet tarvittavasta polymeerimäärästä siroteltiin arkille mahdollisimman tasaisesti, tämän jälkeen asetettiin toinen paperiarkki polymeerin päälle, vaaka nollattiin ja polymeeristä puolet siroteltiin arkin päälle. Lopuksi asetettiin kolmas arkki, jonka jälkeen kuitupolymeeri yhdistelmät kuivattiin painon alla uunissa 2 tuntia 105 °C. Lopuksi materiaalit kuumapuristettiin Vakomet KRO-260 sähköhydraulisella puristimella 5 minuuttia, 50 kN voimalla, 185 °C. Valmiista komposiitista näkyi, että muovi ei ollut levittäytynyt tasaisesti. Valmistusprosessin aikana oli ollut ongelmia johtuen paperiarkeista, jotka kuivuivat liikaa. Kun arkit irrotettiin imukartiosta ja asetettiin tasolle, jossa komposiitti valmistettiin, arkkien reunat eivät pysyneet suorana. Tämä oli yksi syy polymeerin levittymiseen epätasaisesti. Valmistusprosessia muutettiin, jotta saataisiin arkit pysymään suorana valmistuksen aikana. Seuraavaksi valmistettiin yhdelle komposiitille arkit niin, että arkkien valmistuksen jälkeen arkkeja märkäpuristettiin 2 min 360 kPa puristuspaineella ja ennen polypropeenin levitystä arkille ne kasteltiin ionisoidulla vedellä, sumutuspulloa käyttäen, jotta arkit pysyisivät valmistuksen aikana suorana. Tämän jälkeen komposiitti märkäpuristettiin 4 min 360 kPa puristuspaineella ja kuivattiin painon alla uunissa 105 °C. Kuumapuristus tehtiin samoilla parametreilla kuin aikaisemmin. Myös tällä prosessilla oli ongelmia saada komposiiteista tasalaatuisia ja polymeeri pysymään arkkien välissä ja puristumaan tasaisesti. Koska kahdessa edellisessä valmistusprosessissa oli ongelmia, muutettiin valmistustapaa. Loppujen komposiittien väliarkit valmistettiin samalla tavalla kuin edellisessä valmistusprosessissa, mutta päällimmäiset arkit jätettiin arkin valmistuksen jälkeen märäksi, ilman märkäpuristusta. Märkä arkki asetettiin vaa'alle ja puolet polymeeristä levitettiin märälle arkille. Märkäpuristettu väliarkki asetettiin polymeerin päälle ja toinen osa polymeeristä siroteltiin arkin päälle. Lopuksi toinen

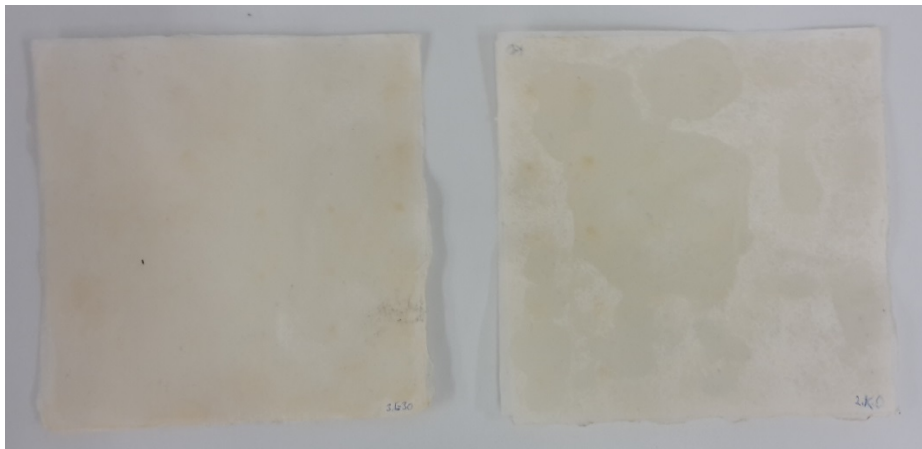
märkä arkki aseteltiin imukartioiden kanssa polymeerin päälle. Tämän jälkeen arkkipolymeeri yhdistelmät märkäpuristettiin 4 min 360 kPa puristuspaineella ja kuivattiin painon alla uunissa 105 °C minimissään 2 h. Märkäpuristuksella poistetaan arkeista vettä, mutta samalla märkäpuristus pakottaa muovirakeita kuitujen väliin. Märkäpuristuksessa syntyy myös kuituja yhdistäviä sidoksia ja arkki tiivistyy (Hägglom-Ahnger ja Komulainen 2006).



Kuva 6. Polymeeri levitettiin sirottimella vaa'alla olevan arkin päälle, ylimääräinen polymeeri puhdistettiin reunoilta siveltimellä.

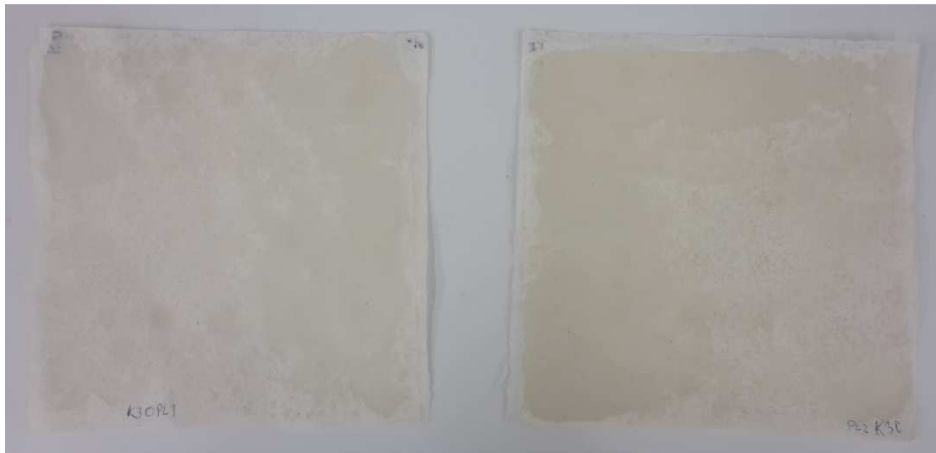
Komposiiteista näkyi edelleen polymeerin epätasainen levittäytyminen. Osa komposiiteista oli läikikkäitä, mikä kertoo polymeerin sirottelun epätasaisuudesta. Sirotteluastias-
assa oli kaksi erikokoista reikäkokoa ja koska polymeeri piti saada siroteltua riittävän nopeasti arkin päälle, että arkki ei kuivu liikaa, käytettiin isompaa reikäkokoa. Arkin liiallinen kuivuminen vaikuttaa painoon ja silloin myös kuidun ja polymeerin oikeaan seossuhteeseen. Yksi syy polymeerin epätasaiseen levittäytymiseen oli sirotusastian isomman reikäkoon käyttö. Lisäksi ongelmia oli saada polymeerijauhe pysymään arkkien välissä valmistuksen eri vaiheissa. Siirrettäessä komposiitteja märkäpuristukseen ja uuniin polymeeriä valui pois arkkien välistä. Koska polymeerimäärät olivat hyvin vähäiset, pienikin polymeerin poistuminen prosessin aikana vaikuttaa seosmäärän tasaisuuteen. Ongelmallista oli myös irrottaa imukartiot arkeista niin että se ei vaikuttanut polymeerin liikkumiseen arkkien välissä. Polymeerin liikkuminen näkyi valmiissa komposiiteissa muovin epätasaisena levittymisenä (Kuva 7). Lisäksi eroja näkyi jauhatetun ja jauhamattoman

kuidun käytössä. Komposiitit, jotka oli valmistettu jauhamattomasta kuidusta, olivat laadultaan epätasaisempia. Polymeeri oli kasautunut reunoille. Tämä voi johtua polymeerin käsittelyn aikaisesta siirtymisen lisäksi koheesio ilmiöstä. Jauhamattoman kuidun arkit ovat huokoisempia kuin jauhetun, joten muovi pääsee helpommin virtaamaan ja tämän takia muovi pääsee kasaantumaan. Koheesio tarkoittaa aineen sisäistä lujuutta, eli samanaisten molekyylien koossa pitävää vaikutusta (Sengupta ja Han 2013). Lisäksi ongelmana voi olla, että muovi ei tartu kuitupintaa. Tähän ratkaisuna olisi esimerkiksi lisäaineiden käyttö.



Kuva 7. Osassa komposiitteja polymeeri pääsi liikkumaan valmistusprosessin aikana. Lisäksi muovin kasaantumiseen voi vaikuttaa muovin virtaaminen puristuksen aikana ja koheesio ilmiö. Vasemmalla puolella on E30PP komposiitti ja oikealla KOPP.

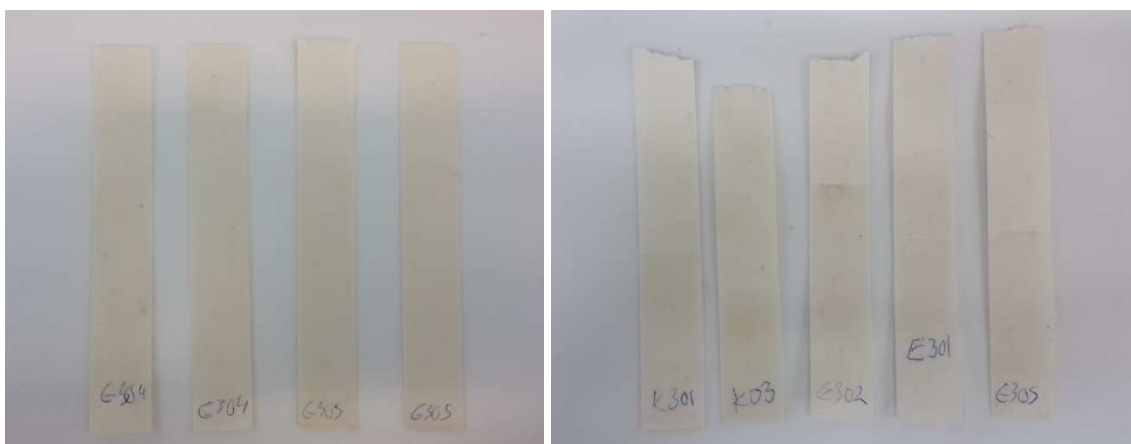
Polylaktidista (PLA) valmistettiin komposiitteja ainoastaan jauhetuista kuiduista. Arkkien valmistusprosessi oli samanlainen kuin valmistettaessa komposiitteja polypropeenista, mutta sirotteluastiassa käytettiin pienempää reikäkokoa, jotta varmistettiin PLA:n tasainen levittäytyminen. PLA oli hienojakoisempaa kuin käytetty polypropeeni ja levittäytyi myös tämän takia tasaisemmin. Vaikka PLA saatiin levitettyä tasaisemmin, ei se poistanut valmistusprosessin ongelmia, kuten polymeerin siirtymistä käsittelyn aikana. PLA-kuitukomposiitit olivat laadultaan epätasaisia ja muovi levittäytyi epätasaisesti arkkien väliin (Kuva 8).



Kuva 8. PLA saatiin levitettyä tasaisemmin arkkien väliin, mutta silti komposiitit olivat epätasaisia. Kuvassa K30PLA komposiitit.

5.3 Testausmenetelmät

Arkit ilmastoitiin 50 % ilmankosteudessa ja 23 °C lämpötilassa ennen mittauksia. Koearkkeista ja komposiiteista mitattiin paino neliömassan määrittystä varten. Näytteiden paksuus määritettiin L&W mikrometrillä. Paperiarkkeista mitattiin myös ilmanläpäisevyys Bendtsen menetelmällä ISO 5636-3 standardin mukaisesti. Ilmanläpäisevyys määritetään mittaamalla ilma tilavuusvirtana, jonka 150 mm wp paine-ero saa aikaan 10 cm² pinta-alan läpi (Aaltonen 1986). Ilmanläpäisevyyteen vaikuttaa esimerkiksi paperin huokoisuus. Ennen taivutus- ja vetokoetta koearkit ja komposiitit leikattiin 15 mm levyisiksi liuskoiksi (Kuva 9). Komposiittien koekappaleiden pituudet olivat 60 mm, eli niiden pituus poikkesi standardista.



Kuva 9. Komposiitit leikattiin 15 mm levyisiksi liuskoiksi. Vasemmalla koeliuskoja ennen veto-koetta ja oikealla katkenneita koeliuskoja vetokokeen jälkeen.

5.3.1 Taivutuskoe

Taivutuskokeessa määritetään taivutusvastuksen avulla koekappaleen jäykkyys, joka ilmaisee arkin kykyä vastustaa taivutusta, eli taivutusjäykkyyden (Levlin 1999). Taivutuskoe tehtiin kaksipistetaivutuksena Lorentzen & Wettren mittarilla, leukavälillä 20 mm ja kiertokulmalla $7,5^\circ$. Voima mikä tarvitaan taivuttamaan liuska määrättyyn kulmaan, on taivutuslujuus (Levlin 1999). Taivutuslujuus on riippuvainen muun muassa neliömas-
sasta, neliömassan kasvaessa taivutuslujuus kasvaa (Kajanto 2008).

5.3.2 Vetokoe

Arkin vetolujuus on riippuvainen muun muassa kuitujen lujuudesta, pituudesta ja kuitusidoksista (Muchorski 2006). Vetokokeessa saadaan tietoa kappaleiden lujuus- sitkeys- ja jäykkyysominaisuuksista (Kurri ym. 1999). Tuloksista määritetään vetolujuus, kimmo-
moduuli ja murtovenymä. Vetokokeessa venytetään koesainvua vakionopeudella ja mitataan venytystä vastustava voima. Vetolujuudella tarkoitetaan siis suurinta kuormitusta, jonka koeliuska kestää murtumatta (Kurri 1999). Murtovenymä ilmaisee koekappaleen pituuden lisäyksen alkuperäiseen pituuteen maksimivoiman kohdalla ja vetomurtotyö (TEA) ilmoittaa koekappaleen pinta-alayksikköä kohti tehdyn kokonaistyön, kun kappale venytetään murtumiseen asti (Aaltonen 1986). Vetomurtotyö kertoo materiaalin kestävydestä ja sitkeydestä (Muchorski 2006). Vetojäykkyys (kN/m) on voima-venymä-
käyrän kulmakertoimen maksimi (Hägglom-Ahnger ja Komulainen 2006). Kimmomo-
duuli määritellään jännityksen ja venymän suhteena ja se ilmaisee kappaleen muodon-
muutosta kuormituksessa (Saarela ym. 2007). Vetokoe suoritettiin MTS 400 mittarilla ISO 1924-2 mukaan, vetonopeus oli 12 mm/min ja leukaväli 50 mm (Kuva 10).



Kuva 10. Vetokoe suoritettiin MTS 400 mittarilla. Vasemmalla ja keskellä PLA komposiitit, oikealla polypropeeni muovi.

5.3.3 Mikrokooppinen tarkastelu

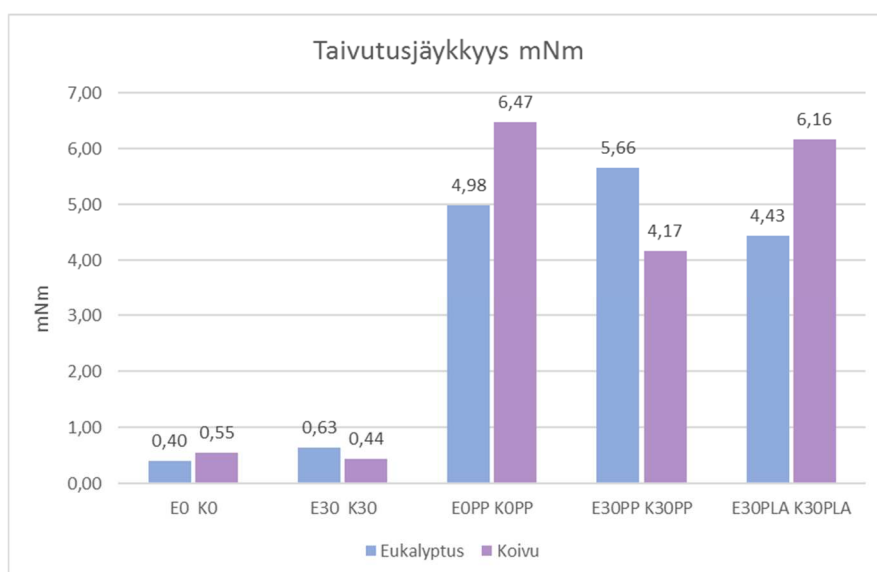
Mikroskooppisessa tarkastelussa tutkittiin koekappaleiden vetokokeen murtumiskohtaa. Optisella mikroskopialla tutkittiin koearkkien ja komposiittien rakennetta. Tarkoituksena oli kuvata koekappaleiden vetokokeessa repeytynyttä leikkauspintaa pyyhkäisyelektronimikroskopialla (SEM) sekä valomikroskopialla. Koska pyyhkäisyelektronimikroskoopista laitetta ei voitu käyttää, suoritettiin mikrokooppinen tarkastelu valomikroskopian lisäksi Epson Expression optisella scannerilla. Scannerilla käytettiin 3200 dpi:n resoluutiolla. Mikrokooppinen tarkastelu suoritettiin Leica ICC50 valomikroskopialla, 10 ja 20 kertaisella suurennoksella.

6. TULOKSET

Schopper Riegler-testin tuloksista näkyy, että jauhetuilla selluilla on korkeampi SR-luku kuin jauhamattomilla (Liite 1). Koivulla oli hieman korkeammat arvot kuin eukalyptuksella. Liitteestä 2 on esitetty arkin ilmanläpäisevyydestä tulokset. Jauhamattomasta koivusta ei saatu yhtään ilmanläpäisevyyden mittaustulosta, mikä indikoi arkin suuresta huokoisuudesta. Jauhamattomasta eukalyptuksesta saatiin vain yksi tulos, joten myös jauhamattomasta eukalyptuskuidusta valmistetut arkit ovat erittäin huokoisia. Arkkien ja komposiittien mittaustuloksista näkyy, että arkkiin paksuudet laskevat jauhetuilla kuiduilla. Koearkkien, komposiittien ja polypropeenin mittaustulokset näkyvät Liitteestä 3. Puhdasta polylaktidia ei tässä tutkimuksessa testattu, vaan tulokset on saatu Aalto-yliopiston erillisestä tutkimuksesta (Paltakari 2018).

6.1 Taivutusjäykkyys

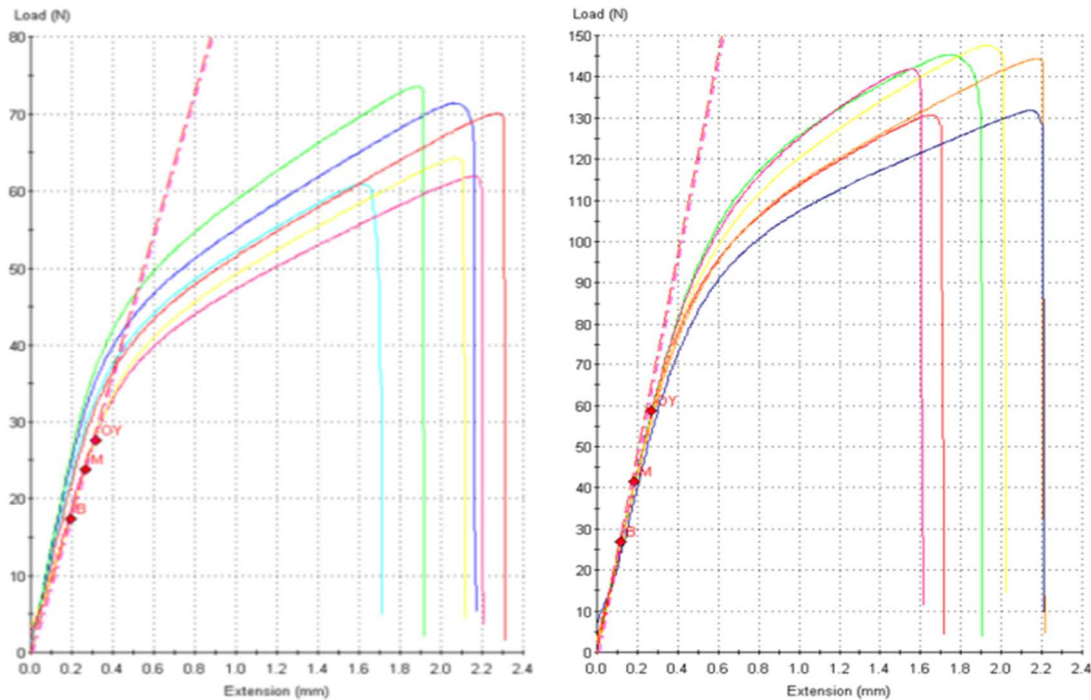
Arkkiin taivutusjäykkyydet ovat hyvin samanlaiset molemmilla kuitulajeilla (Kuva 11). Jauhatus laski hieman koivukuidun taivutusjäykkyyttä, mutta huomattavaa eroa ei jauhetuilla ja jauhamattomilla kuiduilla ollut. Korkein taivutusjäykkyys saadaan jauhamattomalla koivulla ja polypropeenilla. Myös PLA polymeerillä ja koivulla saadaan hyvä taivutusjäykkyys.



Kuva 11. Arkkien ja komposiittien taivutusjäykkyys.

6.2 Vetokoe

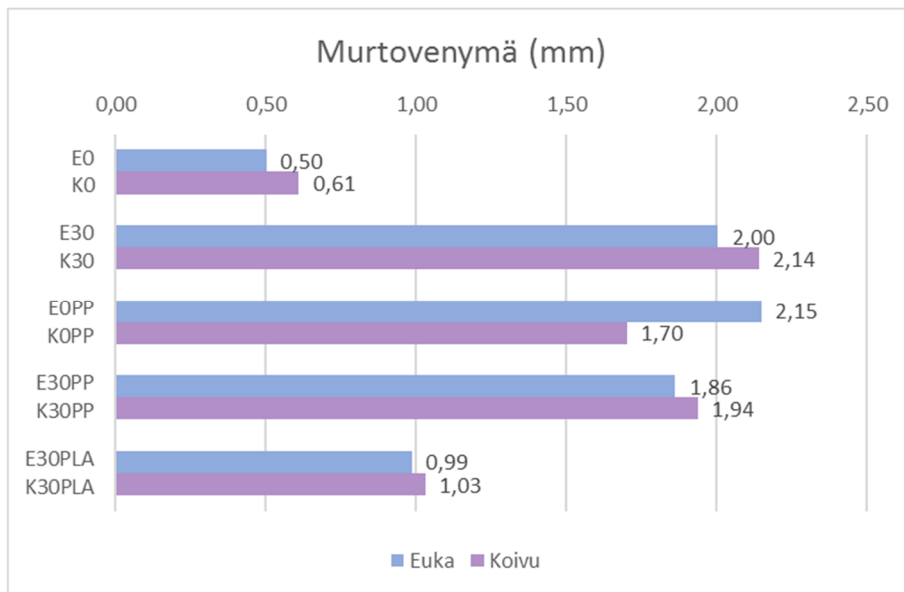
Kuvassa 12 näkyy voimavenymäkäyrät jauhetulle eukalyptusarkille (E30) ja komposiitille, jossa käytetty polypropeenä ja jauhattua eukalyptuskuitua (E30PP). Venymät ovat melko samanlaiset, eli muovin lisääminen kuituun ei lisännyt venymää, mutta komposiiteissa on käytetty enemmän voimaa kuin arkeissa. Liitteessä 4 on esitetty arkkien ja komposiittien voimavenymäkäyrät.



Kuva 12. E30 arkin ja E30PP komposiitin voimavenymäkäyrät. Venymä (mm) on samansuuruisen, mutta komposiitissa on tarvittu voimaa (N) noin kaksi kertaa enemmän kuin arkissa.

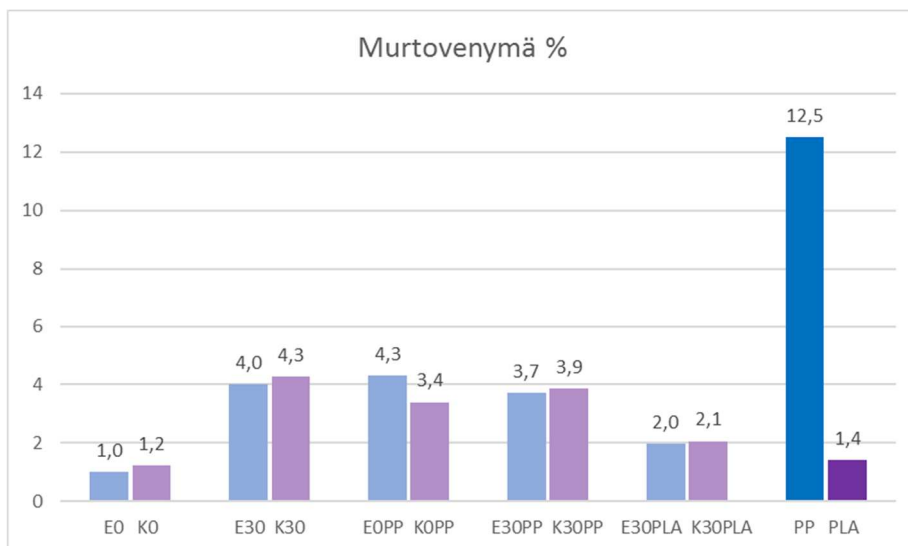
6.2.1 Murtovenymä

Vetokokeessa mitatun murtovenymän tuloksista havaitaan, että parhaat murtovenymät saadaan arkilla, jossa käytettiin jauhetuttua koivua (K30) sekä eukalyptuspolypropeenikomposiitilla (E30PP). Kuidun jauhatus kasvattaa venymää, mutta kuitujen välillä on vain vähäinen ero (Kuva 13). Puhtaalla polypropeenilla on suurin venymä, mutta polylaktidilla venymä on alhainen.



Kuva 13. Arkkien ja komposiittien murtovenymä (mm).

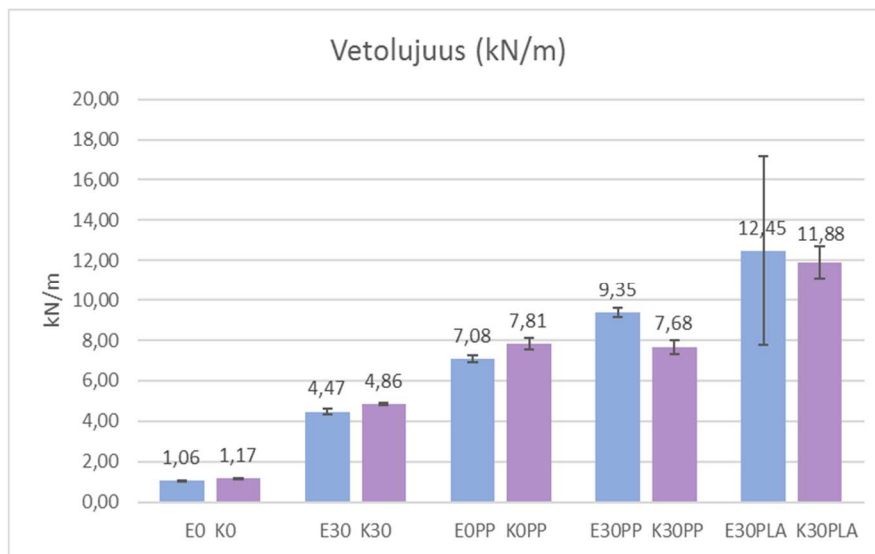
Kun kastellaan murtovenymää prosentteina, PLA:n venymä on samalla tasolla kuin jauhamattomista kuiduista valmistetulla arkilla (Kuva 14). PLA:n lisääminen kuituun laskee murtovenymää. Myöskään polypropeenin lisääminen kuituihin ei paranna venymää, vaikka puhtaan PP:n murtovenymä on huomattavasti arkkien venymää suurempi.



Kuva 14. Arkkien, komposiittien ja muovien murtovenymä prosentteina.

6.2.2 Vetolujuus

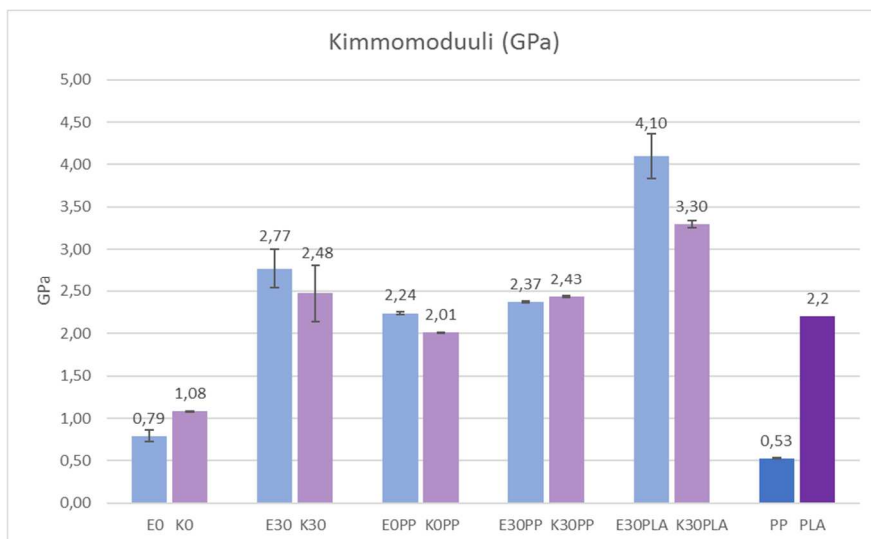
Vetolujuus kasvaa jauhatuksen seurauksena, sekä arkeilla että komposiiteilla, poikkeuksena K30PP komposiitti (Kuva 15). Komposiitilla, jossa käytetään polymeerimatriisina polylaktidia, on korkein vetolujuus. Koivuarkeilla on hieman korkeammat vetolujuudet kuin eukalyptusarkeilla, mutta erot ovat erittäin pienet. Yhdistettäessä kuitua ja polymeeriä on eukalyptuksella paremmat vetolujuudet kuidun jauhatusajan kasvaessa. E30PLA komposiitilla on muihin tuloksiin nähden huomattavasti isompi hajonta.



Kuva 15. Koekappaleiden vetolujuudet

6.2.3 Kimmomoduuli

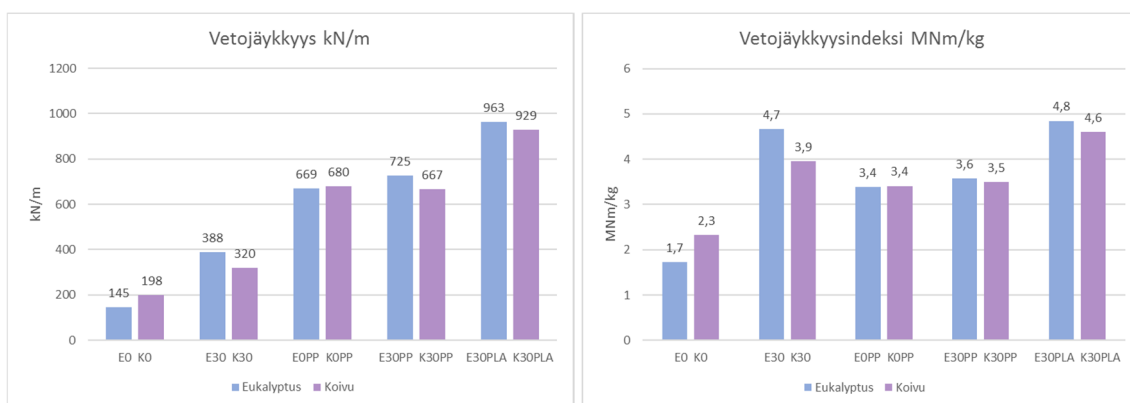
Korkein kimmomoduuli saadaan E30PLA komposiitilla, kuten kuvassa 16 on esitetty. Tuloksista ilmenee kuinka kuidun lisääminen sekä PP että PLA polymeeriin lisää kimmomoduulia. Myös kuidun jauhatuksella on kimmomoduulia nostattava vaikutus. Alhaimmat arvot ovat pelkällä polypropeenilla.



Kuva 16. Arkkien, komposiittien ja polymeerien kimmomoduulit.

6.2.4 Vetojäykkyys

Korkein vetojäykkyys saatiin komposiiteilla, joissa polymeerinä oli polylaktidi (kuva 17). Arkeilla jauhatus nosti vetojäykkyyttä, mutta polypropeeni komposiiteilla kuidun jauhatusteella ei näkynyt huomattavia eroja. Suurin vetojäykkyyksinäksi saadaan E30PLA komposiitilla sekä arkilla, joka on valmistettu jauhetusta eukalyptussellusta.



Kuva 17. Vetojäykkyys ja vetojäykkyyksinäksi.

6.2.5 Vetomurtotyö

Arkkien vetomurtotyö (TEA) kasvaa jauhatusajan kasvaessa (Kuva 18). Korkeimmat TEA arvot saadaan yhdistettäessä eukalyptuskuitua ja polypropeenaa. Komposiiteissa

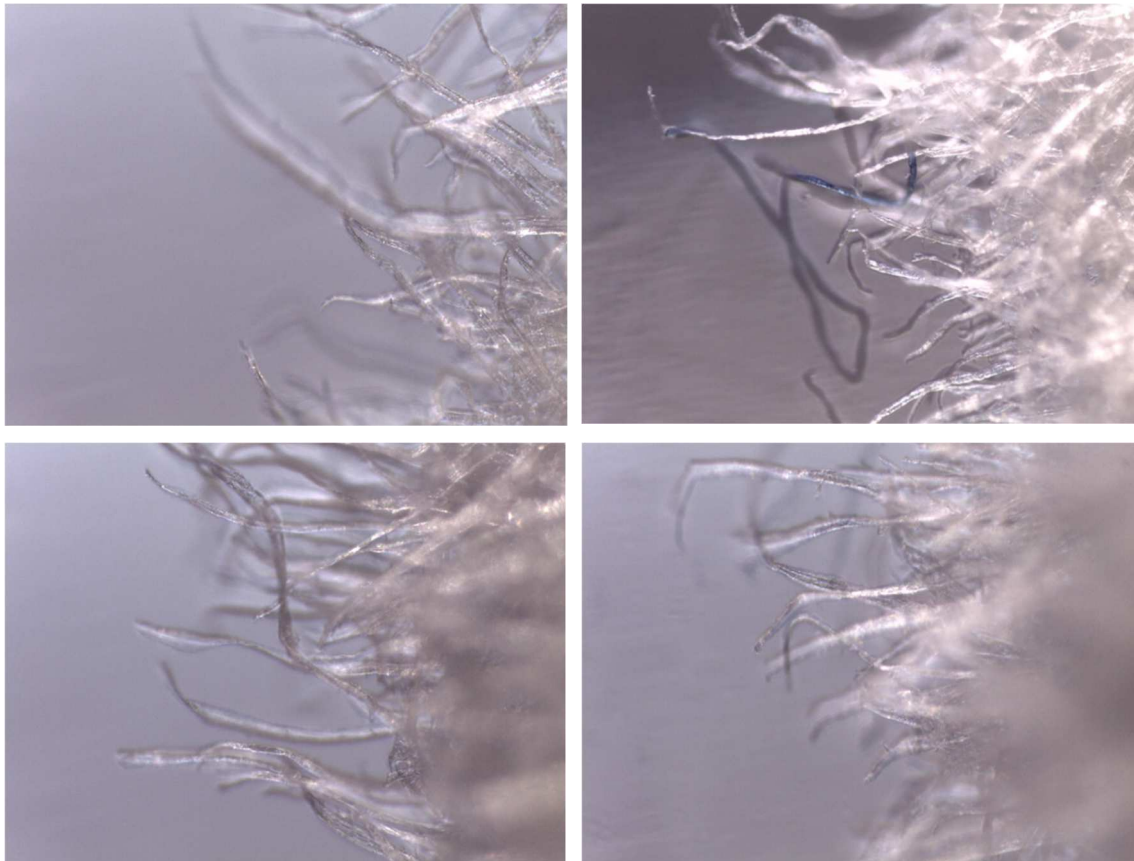
kuidun jauhatusteella ei ole suurta vaikutusta tuloksiin, jauhatus lisää vetomurtotyötä vain vähän. Kun tarkastellaan TEA indeksiä, eli ei huomioida neliömassan vaikutusta, ovat suurimmat arvot jauhetuilla kuiduilla. TEA indeksi kasvaa huomattavasti verrattaessa jauhamatonta kuitua jauhettuun kuituun. Käytettäessä PLA matriisipolymeeriä saadaan alemmat lukemat kuin yhdistettäessä kuitua polypropeeniin. Puhtaan polypropeenin vetomurtotyö on huomattavasti isompi kuin polylaktidin sekä arkkien ja komposiittien (Liite 3).



Kuva 18. Vetomurtotyö ja TEA indeksi.

6.3 Mikroskooppinen tarkastelu

Jauhetusta kuidusta valmistetulla kuidulla on repeytymiskohdassa enemmän katkenneita kuituja, kuin jauhamattomasta valmistetun arkin repeytymiskohdassa (Kuva 19). Jauhamattomasta kuidusta valmistetussa arkissa näkyy myös pidempiä, kokonaisina irronneita kuituja. Jauhettu kuitu muodostaa vahvempia sidoksia kuin jauhamaton kuitu. Tämän takia kuidut eivät ole irronneet kokonaisina sidoksista, vaan sidokset ovat pitäneet ja kuidut ovat katkenneet. Kuvasta näkyy, kuinka eukalyptuksen kuitu on lyhyempää kuin koivun kuitu. Osa jauhetuista eukalyptuskuiduista ovat irronneet pidempinä, koska sitoutuminen ei ole yhtä hyvää kuin pidemmillä koivun kuiduilla. Koivun kuidut ovat sitoutuneet paremmin toisiinsa ja siksi kuvassa näkyy lyhyempiä katkenneita kuituja.



Kuva 19. Vasemmalla ylhäällä E0 arkin katkeamiskohta, oikealla K0. Vasemmalla alhaalla E30 ja oikealla alhaalla K30 arkin katkeamiskohta.

Kuvassa 20. on valomikroskopiakuvat komposiiteista, joissa matriisina on käytetty polypropeenaa. Molemmista koivukuidusta valmistetuissa komposiiteissa näkyy pidempiä kuituja. Muovia on ollut näissä komposiiteissa epätasaisemmin ja komposiitti on katkenut kohdassa jossa, muovi ei ole tasaisesti imeytynyt kuituun. Eli kuidun ja matriisin rajapinnan lujuus on huonompi katkeamiskohdassa.



Kuva 20. Vasemmalla ylhäällä E0PP komposiitin katkeamiskohta ja oikealla K0PP. Vasemmalla alhaalla E30PP komposiitin ja oikealla K30PP komposiitin katkeamiskohta. Komposiitissa, jossa käytetty koivukuitua, näkyy pidempiä kuituja.

Komposiiteissa, jossa matriisipolymeerinä käytettiin polylaktidia, on kuidut katkenneet lyhyiksi (Kuva 21). Komposiiteissa, joissa on yhdistettynä koivukuitua ja polylaktidia, näkyy tasaisemmin katkenneita kuituja. Eukalyptuksen ja PLA:n yhdistelmässä esiintyy hieman pidempiä kuituja ja ne ovat katkenneet epätasaisemmin.



Kuva 21. Vasemmalla E30PLA komposiitti ja oikealla K30PLA.

7. TULOSTEN TARKASTELU

Komposiittien valmistuksessa oli ongelmia ja tämä vaikutti komposiittien laatuun. Tämän takia kaikista komposiiteista ei saatu riittävää määrää rinnakkaisia tuloksia. Koekappaleiden laatuongelmat ja joidenkin komposiittien rinnakkaistulosten vähäinen määrä vaikuttavat tulosten luotettavuuteen ja mahdollisuuteen verrata tuloksia muihin tutkimuksiin. Tuloksia voidaan vertailla, kun huomioidaan komposiittien mahdolliset laatuongelmat. Kaikissa komposiiteissa kuitu-muovisuhde ei ole tavoiteltu 50:50, vaan kuituja on enemmän kuin polymeeriä ja tämä näkyy tuloksissa. Toisaalta varsinkin PLA komposiiteissa, jouduttiin koekappaleet leikkaamaan alueelta, johon muovi oli kasaantunut, joten näissä koekappaleissa on mahdollisesti muovia enemmän kuin kuitua.

7.1 Kuituominaisuuksien tarkastelu

Koivuarkeilla on hieman korkeammat vetolujuudet kuin eukalyptusarkeilla. Arkin vetolujuus riippuu kuidun lujuudesta, mutta ensisijaisesti kuitusidoksien lujuuksista (Levlin 1999). Koivukuitu on pidempää kuin eukalyptuskuitu, joten se muodostaa vahvempia kuitusidoksia. Häggblom-Ahnger ja Komulainen (2006) mukaan paksuuteen nähden ohutseinäiset kuidut lommahtavat helposti, ja muodostavat tiiviin kuituverkoston. Koivulla on kuidun pituuteen nähden ohutseinäisemmät kuidut kuin eukalyptuksella, joten ne lommahtavat helpommin ja muodostava myös näin parempia sidoksia (Häggblom-Ahnger ja Komulainen 2006). Toisaalta eukalyptuskuidulla on korkeampi selluloosapitoisuus ja tämä indikoi paremmasta lujuudesta kuin koivukuidulla. Yleisesti voidaan sanoa, että kuidun vetolujuus ja kimmomoduuli kasvavat selluloosapitoisuuden kasvaessa (John ja Thomas 2008). Tämä ei kuitenkaan näy vetolujuustuloksissa, mutta jauhetusta eukalyptuksesta valmistetulla arkilla on korkeampi kimmomoduuli kuin koivusta valmistetulla.

Erot eukalyptus ja koivukuitujen pituudessa näkyvät myös valomikroskopiassa. Suuria eroja tuloksissa koivu- ja eukalyptusarkeilla ei kuitenkaan ole. Vaikka koivu ja eukalyptuskuidut ovat hyvin samanlaisia, muun muassa niiden rakenteessa ja kemiallisessa koostumuksessa on kuitenkin eroavuuksia, jotka vaikuttavat arkkien muodostukseen ja tuloksiin. Kuitujen jauhatuksen vaikutus arkkien tuloksissa erottuu selkeästi. Ainoastaan

taivutusjäykkyydessä jauhamattomilla ja jauhetuilla kuiduilla valmistetuilla arkeilla on vain vähäiset erot. Taivutuslujuus on riippuvainen muun muassa neliömassasta, korkea neliömassa antaa korkean taivutusjäykkyyden (Kajanto 2008). Jauhettu koivukuitu (K30) on arkeista ohuin ja sillä on myös alhaisin neliömassa, mikä vaikuttaa taivutusjäykkyyteen. Tämä näkyy tuloksissa verrattaessa jauhetusta eukalyptuksesta valmistettuun arkiin. Jauhatus parantaa kuitusidosten muodostamista, mikä näkyy tuloksissa. Jauhetusta kuidusta valmistetulla arkilla on selkeästi paremmat vetolujuudet, murtovenymä ja kimmomoduuli kuin jauhamattomalla arkilla. Myös mikroskooppisesta tarkastelusta näkyy jauhatuksen vaikutus kuitusidoksiin. Jauhetusta kuidusta valmistetulla arkilla vetokokeen seurauksena kuidut ovat lyhyempiä ja katkenneita verrattaessa jauhamattomasta kuidusta valmistettuun arkiin, jossa kuituja on enemmän irronnut kokonaisina.

7.2 Komposiitit

Komposiittien arvoihin vaikuttaa molempien materiaalien ominaisuudet. Tarkastellessa jauhetun eukalyptusarkin sekä E30PP komposiitin voimavenymäkäyrää, nähdään että venymää ei tule lisää, kun muovi lisätään, mutta lujuutta tulee. Tämä tarkoittaa, että saman venymän aikaansaamiseksi on tarvittu huomattavasti enemmän voimaa. Kun kuituun lisätään polymeeriä, kasvaa vetolujuus sekä jauhamattomalla, että jauhetulla kuidulla. PLA-kuitu yhdistelmä on lujempaa kuin PP-kuitu. Tätä tukee tutkimustulokset, joiden mukaan PLA komposiitit ovat lujempia kuin PP. Bledzki ja Jaszkievicz (2010) tutkivat luonnonkuitukomposiittien mekaanisia ominaisuuksia verraten biopolymeerejä polypropeeniin. Verrattaessa komposiitteja joissa matriisipolymeerinä oli PLA ja PP, oli PLA komposiitilla sekä korkeampi vetolujuus, että kimmomoduuli (Bledzki ja Jaszkievicz ym. 2010). Sekä koivusta valmistetut arkit, että komposiitit ovat hieman lujempia kuin eukalyptuksesta valmistetut, poikkeuksena jauhettu koivu ja polymeeri yhdistelmä (K30PP). K30PP vetolujuus kertoo mahdollisesti komposiitin epätasaisesta laadusta.

Kuitumatriisin rajapinnan lujuus näkyy komposiitin veto- ja taivutuslujuuksien tuloksissa (Grozdanov ym. 2015). Koivukuitu ja polypropeeni yhdistelmässä muovi ja kuitu ovat levittäytyneet epätasaisesti, mikä näkyy myös mikroskooppisessa tarkastelussa. K30PP komposiitilla näkyy selkeästi pidempiä kuituja kuin E30PP komposiitilla. Kuidut ovat irronneet pidempinä, mikä kertoo kuidun ja matriisin rajapinnan heikosta lujuudesta. Tämä viittaa siihen, että muovi ei ole levittäytynyt tasaisesti, eikä kuidut ole kastuneet

tasaisesti muoviin. Jotta saadaan hyvä kuidun ja matriisin rajapinnan lujuus, on kutujen oltava tasaisesti kostuneet muoviin (Bledzki ym.1996). Myös K0PP komposiitin mikroskooppisessa tarkastelussa näkyy pidempiä kuituja kuin jauhamattomasta eukalyptuksesta valmistetusta komposiiteissa. E0PP komposiitin mikroskooppisessa tarkastelussa näkyy koeliuskassa enemmän muovia verrattaessa K0PP komposiittiin. Matriisipolymeerinä PLA tuo enemmän vetolujuutta kuin PP polymeeri. Mikroskooppisessa tarkastelussa näkyy, että komposiitit, jossa käytetty PLA:ta ovat katkenneet tasaisemmin ja kuvissa ei näy pitkiä kuituja.

Yhdistettäessä muovia kuituihin ei tämä paranna murtovenymää, vaan arkeilla on parempi venymä kuin komposiiteilla. Seostettuna kuitua polylaktidiin, murtovenymä alenee huomattavasti. Polylaktidi on hauras polymeeri ja tämä näkyy murtovenymätuloksissa. Tarkasteltaessa murtovenymää prosentteina nähdään, kuinka suuri ero PLA ja PP polymeereillä on. Polypropeenin murtovenymä on huomattavasti isompi kuin kuidun ja PLA:n. Kuidulla on parempi murtovenymä kuin puhtaalla polylaktidilla ja PLA:n lisääminen kuituun ei tuo lisäarvoa murtovenymään. Visuaalisesti tarkasteltuna K30PP komposiitit olivat läikikkäitä, eli muovi ei ollut levittäytynyt tasaisesti. Epätasaisuus ei kuitenkaan näy murtovenymätuloksissa, vaan jauhetun koivukuidun ja polypropeenin yhdistelmänä komposiitti otti hyvin vastaan vetoa.

Tarkasteltaessa materiaalien kimmomoduulia, nähdään että kuidulla on korkeampi kimmomoduuli, eli jäykkyys, kuin polypropeenilla ja polylaktidilla. Kuitu siis kasvattaa jäykkyyttä verrattaessa muoviin. Tätä tukee myös tutkimustulokset. Peltola ym. 2014 tutkivat eri puukuituja seostettuna polypropeeniin sekä polylaktidiin ja kuidun lisääminen muoviin nosti molempien muovien kimmomoduulia. Polypropeenilla on alhaisin kimmomoduuli ja lisättäessä polypropeenaa kuituun, laskee materiaalin kimmomoduuli. Polylaktidilla on huomattavasti korkeampi kimmomoduuli kuin polypropeenilla ja yhdistettäessä kuitua polylaktidiin, saadaan korkeampi kimmomoduuli, kuin pelkällä kuidulla. On tutkittu, että käytettäessä luonnonkuitukomposiiteissa PLA matriisipolymeeriä, saadaan korkeampi lujuus ja jäykkyys kuin PP polymeerillä (Pickering 2016). Eukalyptus arkeilla sekä komposiiteilla, joissa käytettiin eukalyptuskuitua, saatiin korkeampi kimmomoduuli, kuin käytettäessä koivukuitua. Poikkeuksena jauhamaton kuitu ja K30PP komposiitti. PLA komposiittien erot voivat johtua myös epätasaisesta polymeerin levittymisestä ja kuitu-muovisuhteesta. Peltola ym. (2014) seostivat koivu- ja eukalyptussellua

polypropeeniin ja polylaktidiin ja saivat PLA:lla ja eukalyptussellulla hieman korkeammat kimmomoduulit kuin koivulla. Yhdistettynä polypropeenin ja koivusellua saatiin taas korkeammat tulokset kuin eukalyptuksella ja polypropeenilla (Peltola ym.2014). Tuloksissa tosin ei näy suurta eroa koivun ja eukalyptuksen välillä. Kuitumäärä oli alhaisempi, kuin tässä tutkimuksessa, 30 % ja valmistusmenetelmät erilaiset.

Yhdistettäessä muovia kuituun kasvoi taivutusjäykkyys huomattavasti verrattaessa arkien tuloksiin. Muovin taivutusjäykkyys on suurempi kuin kuidun ja tämän takia taivutusjäykkyys kasvaa huomattavasti. Jauhamaton koivu yhdistettynä polypropeeni oli jäykempää kuin jauhamattoman eukalyptuskuidun ja polypropeenin. Eukalyptuskuidulla lujitettu polypropeenin taivutusjäykkyys kasvoi, kun käytettiin jauhattua kuitua. Jauhattu koivukuitu lisättyä polypropeeniin alensi komposiitin taivutusjäykkyyttä verrattuna jauhamattomaan koivukuituun, tämä voi johtua komposiittien laatuongelmista. Käytettäessä PLA:ta polymeerimatriisina, jauhetun koivun taivutusjäykkyydet olivat samalla tasolla kuin jauhamattoman koivun ja PP:n.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn tavoitteena oli tutkia luonnonkuitujen ominaisuuksien vaikutusta luonnonkuitukomposiitteihin. Tavoitteena oli selvittää, saadaanko luonnonkuitua ja muovia yhdistämällä paremmat mekaaniset ominaisuudet kuin mitä kuiduista valmistetuilla arkeilla ja muovilla on erillisinä materiaaleina. Työssä tarkasteltiin koivu- ja eukalyptuskuidun eroja ja jauhatuksen vaikutusta kuidun ominaisuuksiin. Lisäksi vertaatiin polypropeenin (PP) ja polylaktidin (PLA) eroja komposiittimateriaalina. Kokeellisessa osiossa valmistettiin eukalyptus- ja koivusellusta koearkkeja, joita yhdistettiin polypropeeniin ja polylaktidiin. Tavoitteena olisi, että kuituja ja muovia yhdistettäessä saataisiin paremmat mekaaniset ominaisuudet kuin materiaalien ominaisuudet ovat erillisinä.

Jauhatuksen vaikutus ominaisuuksiin on selkeä. Kuitujen jauhatuksella saadaan parannettua kaikkia arkin mekaanisia ominaisuuksia, ainoastaan taivutusjäykkyyteen jauhatuksella ei ole huomattavaa vaikutusta. Kuidun jauhatuksella nähdään pääsääntöisesti sama vaikutus komposiittien tuloksiin. Kuitulajin vaikutus tuloksiin on suhteellisen pieni.

Vaikka koivulla ja eukalyptuksella on tiettyjä rakenteellisia ja koostumuksellisia eroja, ovat nämä niin vähäisiä, että ne eivät vaikuta merkittävästi tuloksiin. Koivulla saadaan kuitenkin hieman parempi vetolujuus ja murtovenymä, mutta eukalyptus on jäykempää. Arkkeja ja polylaktidia yhdistettäessä saadaan parannettua jäykkyyttä verrattaessa molempiin materiaaleihin. Komposiitit, jotka valmistettiin polylaktidista, olivat lujempia ja jäykempiä verrattaessa polypropeenista valmistettuihin komposiitteihin. Tätä tukee myös muut tutkimustulokset. Polypropeenista valmistetulla komposiiteilla saatiin parempi venymä ja taivutusjäykkyys.

Tulokset osoittavat, että yhdistettäessä kuitua ja muovia komposiitiksi, saadaan hyviä mekaanisia ominaisuuksia verrattuna luonnonkuidusta valmistettujen arkkien tai puhtaan polymeerin ominaisuuksiin. Komposiiteissa pitää kuitenkin huomioda kuitujen ja polymeerien erilaiset ominaisuudet, jotta päästään parhaisiin ratkaisuihin. Erilaisilla kuiduilla sekä eri polymeereillä voi olla hyvinkin isoja eroja, kuten joillakin polypropeenin ja polylaktidin ominaisuuksilla. Tämän tutkimuksen tuloksia tarkasteltaessa ja tehtäessä johtopäätöksiä pitää huomioda komposiittien mahdolliset laatuongelmat, jotka voivat vaikuttaa tulosten luotettavuuteen ja vertailtavuuteen. Tulokset noudattavat komposiittien osalta pääsääntöisesti aikaisempien tutkimusten tuloksia, mutta komposiittien mekaanisten ominaisuuksien lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin myös arkkien ja komposiittien eroja ja saatiin näistä vertailutuloksia. Tutkimuksessa käytettiin myös erilaista näytteen valmistusmenetelmää. Jatkossa komposiittien, joissa käytetään kuitumateriaaleina arkkeja, valmistustapaa pitää vielä kehittää. Yhtenä ratkaisuna voisi olla esimerkiksi apu- tai kytkentäaineet parantamaan muovin ja arkkien yhteensopivuutta. Jatkossa olisi myös mielenkiintoista tarkastella kuitulajeja, joiden ominaisuudet eroavat toisistaan enemmän kuin koivu ja eukalyptus. Tutkimuksessa voisi esimerkiksi käyttää havu- ja lehtipuukuituja, joilla rakenne ja kemiallinen koostumus eroavat enemmän kuin tämän tutkimuksen kuitulajeilla.

9. LÄHTEET

- Aaltonen, P. 1986. Kuituraaka-aineen ja paperin testausmenetelmiä. Otakustantamo, Espoo. 98 s.
- Akin, D.E. 2010. Flax – Structure, Chemistry, Retting and Processing. Julkaisussa: Müssig, J. (toim.). Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications. John Wiley & Sons. Chichester Ltd. s. 88 - 108. ISBN: 978-0-470-69508-1.
- Álen, R. 2009. Structure and chemical composition of wood. Julkaisussa: Stenius, P (toim.). Forest Products Chemistry, Papermaking science and technology, Book 3. Fapet Oy, Helsinki. s.12-58.
- Amaducci, S. ja Gusovius, H-J. 2010. Hemp – Cultivation, Extraction and Processing. Julkaisussa: Müssig, J. (toim.). Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications. John Wiley & Sons. Chichester Ltd. s.109-134. ISBN: 978-0-470-69508-1.
- Anandjiwala, R.D. ja John, M. 2010. Sisal – Cultivation, Processing and Products. Julkaisussa: Müssig, J. (toim.). Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications. John Wiley & Sons. Chichester Ltd. s. 135-161. ISBN: 978-0-470-69508-1.
- Area, M. and Popa, V. 2014. Wood Fibres for Papermaking. Smithers Rapra Technology Limited, Shrewsbury. 93 s. ISBN 978-1-90903-087-9.
- Bajpai, P., Singh, I. ja Madaan, J. 2014. Development and characterization of PLA-based green composites: A review. Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol 27(1): 52–81.
- Bismarck, A., Mishra, S. ja Lampke, T. 2005. Plant Fibers as Reinforcement for Green Composites. Julkaisussa: Mohanty, A., Misra, M. and Drzal, L. (toim.). Natural Fibres, Biopolymers, and Biocomposites, Taylor & Francis Group, Boca Raton. s. 37-108.
- Bledzki, A. ja Gassan, J. 1999. Composites reinforced with cellulose based fibres. Prog. Polym. Sci. 24: 221–274.

- Bledzki, A ja Jaszkievicz, A. 2010. Mechanical performance of biocomposites based on PLA and PHBV reinforced with natural fibres – A comparative study to PP. *Composites Science and Technology* 70: 1687–1696.
- Bledzki, A. Reihmane, S. ja Gassan, J. 1996 Properties and Modification Methods for Vegetable Fibers for Natural Fiber Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 59: 1329-1336.
- Bledzki, A., Sperber, V. ja Faruk, O. 2002. Natural and Wood Fibre Reinforcement in Polymers. Rapra Technology Limited, Shrewsbury. 144 s. ISBN 1-85957-359-2.
- Bledzki, A., Mamuna, A. ja Volk, J. 2010. Physical, chemical and surface properties of wheat husk, rye husk and soft wood and their polypropylene composites. *Composites: Part A* 41: 480–488.
- Biermann, C. 1996. Handbook of pulping and papermaking. Academic Press, San Diego 754 s.
- Botnia Nordic. 2017. Botnia Nordic Birch AKI. Data Sheet. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.metsafibre.com/fi/asiakkaat/botnia-tuotteet/Pages/default.aspx>. [Viitattu 1.5.2018].
- Brydson, J. 1999. *Plastics Materials*. Butterworth-Heinemann, Oxford. 899 s. ISBN 9780750641326.
- Clemons, C. 2008. Raw materials for wood-polymer composites. Julkaisussa: *Wood-polymer composites*. Woodhead Publication, Ltd. Boca Raton, Cambridge, s. 1-22.
- Dochia, M., Sirghie, C., Kozlowski, R. M. ja Roskwitalski, Z. 2012. Cotton fibres. Julkaisussa: Kozlowski, R. (toim.). *Handbook of Natural Fibres*. Volume 1: Types, Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation. Woodhead Publishing Limited. Oxford-Cambridge-Philadelphia-New Delhi. 11-23 s. ISBN: 978-1-84569-697-9.
- Dicker, M. P.M., Duckworth, P.F., Baker, A.B., Francois, G., Hazzard, M.K. and Weaver, P.M. 2014. Green composites: A review of material attributes and complementary applications. *Composites: Part A* 56: 280–289.
- Faruk, O., Bledzki, A., Fink, H-P. and Sain, M. 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science* 37: 1552– 1596.
- Faruk, O., Bledzki, A., Fink, H-P. and Sain, M. 2014. Progress Report on Natural Fiber Reinforced. *Macromolecular Materials and Engineering* 299: 9–26.

- Godavarti, S. 2005. Thermoplastic Wood Fiber Composites. Julkaisussa: Mohanty, A., Misra, M. and Drzal, L. (toim.). Natural Fibres, Biopolymers, and Biocomposites, Taylor & Francis Group, Boca Raton. s. 347-390.
- Graupner, N. ja Müssig, J. 2010. Technical Applications of Natural Fibres: An Overview. Julkaisussa: Müssig J. (toim.). Industrial Applications of Natural Fibres. Structure, Properties and Technical Applications. John Wiley & Sons, West Sussex. s. 63-71.
- Grozdanov, A., Jordanov, I., Errico, M., Gentile, G. ja Avella, M. 2015. Biocomposites based on natural fibers and polymer matrix – From theory to industrial products. Julkaisussa: Thakur, K. ja Kessler, M.R. (toim.). Green biorenewable biocomposites: From Knowledge to Industrial Applications. Apple Academic Press, Inc. Oakville. s. 289-322. ISBN: 978-1-4822-5267-5.
- Göltenboth, F. ja Mühlbauer, W. 2010. Abacá – Cultivation, Extraction and Processing. Julkaisussa: Müssig, J. (toim.). Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications. John Wiley & Sons. Chichester Ltd. s. 197-217. ISBN: 978-0-470-69508-1.
- Haimi, S. 2017. Täysin biohajoava Sulapac® -materiaali haastaa muovin. Biotalous. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.biotalous.fi/taysin-biohajoava-sulapac-materiaali-haastaa-muovin/>. [Viitattu 27.4.2017].
- Hakkarainen M. & Wistrand A.-F. 2011. Update on Polylactide Based Materials. iSmithers Rapra Publishing. Shawbury, Shrewsbury. 167 s.
- Hakkila, P. ja Verkasalo, E. 2009. Structure and properties of wood and woody biomass. Julkaisussa: Kellomäki, S. (toim.). Forest Resources and Sustainable Management, Papermaking science and technology, Book 2. Paper Engineer's Association/Paperi ja Puu Oy, Helsinki. s. 133-215.
- Henriksson, G., Brännvall, E. ja Lennholm, H. 2009. The Trees. Julkaisussa: Ek, M., Gellerstedt, G. ja Henriksson, G. Pulp and Paper Chemistry and Technology, Volume 1. Wood Chemistry and Wood Biotechnology. Walter de Gruyter GmbH & Co, Berlin. s. 45-70.
- Huda, M.S., Mohanty, A.K., Drzal, L.T., Schut, E. ja Misra, M. 2005. "Green" composites from recycled cellulose and poly(lactic acid): Physico-mechanical and morphological properties evaluation. Journal of Materials Science 40: 4221 – 4229.
- Huda, S., Reddy, N., ja Yang, Y. 2012. Ultra-light-weight Composites from Bamboo Strips and Polypropylene Web with Exceptional Flexural Properties. Composites: Part B 43:1658–1664.

- Hägglom-Ahnger, U. ja Komulainen, P. 2006. Kemiallinen metsäteollisuus II, Paperin ja kartongin valmistus. Gummerus Kirjapaino, Jyväskylä. 279 s. ISBN: 952-13-1746-9.
- Ingeo™ Biopolymer 3251D. Technical Data Sheet. NatureWorks. 4 s.
- Jain, S., Kumar, R. ja Jindal, U. 1992. Mechanical behavior of bamboo and bamboo composite. *Journal of Materials Science* 27: 4598–4604.
- Jayasekara, C. ja Amarasinghe, N. 2010. Coir – Coconut Cultivation, Extraction and Processing of Coir. Julkaisussa: Müssig, J. (toim.). *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. John Wiley & Sons. Chichester Ltd. s. 197-217 ISBN: 978-0-470-69508-1.
- Joffe, R. ja Andersons J. 2014. Mechanical Characterization and Properties of Cellulose Fibres. Julkaisussa: Oksman, K., Mathew, A., Bismarck, A., Rojas, O. ja Mohini, S. (toim.). *Handbook Of Green Materials: Processing Technologies, Properties And Applications*. World Scientific. New Jersey. s. 712-741.
- Johnson, R., Mwaikambo, L. ja Tucker, N. 2003. Biopolymers. iSmithers Rapra Publishing. 150 s.
- Kajanto, I. 2008. Structural mechanics of paper and board. Julkaisussa: *Paper Physics. Papermaking science and technology*, Book 16. Gummerus Oy, Jyväskylä. s. 229-264.
- Khalil, H., Alwani, M., Ridzuan, R., Kamarudin, H. ja Khairul. A. 2008. Chemical Composition, Morphological Characteristics, and Cell Wall Structure of Malaysian Oil Palm Fibers. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 47: 273–280.
- Kissel, W., Han, J. ja Meyer, J. 1999. Polypropylene: Structure, Properties, Manufacturing Processes, and Applications. Julkaisussa: Karian, H. (toim.). *Handbook Of Polypropylene And Polypropylene Composites*. Marcel Dekker, Inc. New York. s. 15-37.
- Kellomäki, S. 2000. Trees, forests and forest ecosystems. Julkaisussa: Kellomäki, S. (toim.). *Forest Resources and Sustainable Management, Papermaking science and technology*, Book 2. Paper Engineer's Association/Paperi ja Puu Oy. s. 79-93.
- Kozłowski, R., Mackiewicz, -Talarczyk, M. ja Allam. A. 2012. Bast fibres: flax. Julkaisussa: Kozłowski, R. (toim.). *Handbook of Natural Fibres. Volume 1: Types, Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation*. Woodhead Publishing Limited, Oxford. s. 56-113. ISBN: 978-1-84569-697-9.

- Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoo, N. ja Trada, M. 2011. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B* 42: 856–873.
- Kurri, V., Malen, T., Sandell, R. ja Virtanen, M. 1999. *Muovitekniikan perusteet*. Opetushallitus, Hakapaino Oy. 238 s.
- Kärkkäinen, M. 2003. *Puutieteen perusteet*. Metsälehti Kustannus, Hämeenlinna. 451 s.
- Levlin, J-E. 1999. General physical properties of paper and board. Julkaisussa: Gullichsen, J. ja Paulapuro, H. (toim.). *Pulp and paper testing, Papermaking science and technology*, Book 17. Fapet Oy, Jyväskylä. s. 137-162.
- Madsen, B. Løgstrup Andersen, T. ja Lilholt, H. 2014. Volumetric Composition: Fiber Content and Porosity. Julkaisussa: Oksman, K., Mathew, A., Bismarck, A., Rojas, O. ja Sain, M. (toim.). *Handbook Of Green Materials: Processing Technologies, Properties And Applications (In 4 Volumes)*. World Scientific. New Jersey. s. 835 – 848.
- Migneault, M., Koubaa, A., Erchiqui, F., Chaala, A., Englund, K., Krause, C. ja Wolcott, M. 2008. Effect of Fiber Length on Processing and Properties of Extruded Wood-Fiber/HDPE Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 110: 1085–1092.
- McDougall, G., Morrison, I., Stewart, D., Weyersb, J. ja Hillman, J. *Plant Fibres : Botany, Chemistry and Processing for Industrial Use*. *Sci Food Agri* 62: 1-20.
- Mohanty, A., Misra, M. ja Hinrichsen, G. 2000. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromol. Mater. Eng.* 276/277: 1–24.
- Mohanty, A., Misra, M., Drzal, L., Selke, S., Harte, B. ja Hinrichsen, G. 2005. Natural Fibers, Biopolymers, Biocomposites: An Introduction. Julkaisussa: Mohanty, A., Misra, M. and Drzal, L. (toim.). *Natural Fibres, Biopolymers, and Biocomposites*, Taylor & Francis Group, Boca Raton. s. 1-36.
- Moplen HP2674. 2017. Käyttöturvallisuustiedote asetuksen (EY) N:o 1907/2006 mukaisesti. LyondellBasell. 15 s.
- Mukherjee, P. S. ja Satyanarayana K. G. 1986. Structure and properties of some vegetable fibres. Part 2 Pineapple fibre (*Anannus Comosus*). *Journal of Materials Science* 21: 51-56.
- Muchorski 2006. Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus). *Tappi* 494-01. 14 s.

- Niaounakis, M. 2013. Biopolymers: Reuse, Recycling, and Disposal. Elsevier Inc, Oxford. 414 s.
- Paltakari, J. 2018. Professori Jouni Paltakari, Biotuotteiden ja biotekniikan laitos, Aalto-yliopisto. Haastattelu 18.4.2018.
- Pandey, J., Ahn, S., Lee, C., Mohanty, A. ja Misra, M. 2010. Recent Advances in the Application of Natural Fiber Based Composites. *Macromolecular Materials and Engineering* 295: 975–989.
- Patt, R., Kordsachia, O. ja Fehr, J. 2006. European hardwoods versus Eucalyptus globulus as a raw material for pulping. *Wood Sci Technol* 40: 39–48.
- Peltola, H., Pääkkönen, E., Jetsu, P. ja Heinemann, S. 2014. Wood based PLA and PP composites: Effect of fibre type and matrix polymer on fibre morphology, dispersion and composite properties. *Composites: Part A* 61: 13–22.
- Pickering, K.L., Efendy, M.G. ja Le, T.M. 2016. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites: Part A* 83: 98–112.
- Prambauer, M., Paulik, C. ja Burgstaller, C. 2015. Mechanical properties of structural paper-polypropylene composite laminates. *Materials Science Forum Vols 825-826*: 11-18.
- Puu-19.210. 2007. Puun rakenne ja kemia. Elävä puu ja puuaineksen muodostuminen. Luento 2. TTK. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: puukemia.tkk.fi/fi/opinnot/kursit/19-1000/luennot/L2.pdf. [Viitattu 29.4.2018].
- Rana, A. ja Bandyopadhyay, S. 2013. Development and Applications of Biocomposites from Renewable Resources. Julkaisussa: Thakur, V. K. ja Singha, A. S. (toim.). Biomass-based Biocomposites. Smithers Rapra Technology Ltd. Shrewsbury. s.11-46. ISBN: 978-1-84735-982-7.
- Rowell, R. 2008. Natural fibers:types and properties. Julkaisussa: Pickering, K. (toim.) Properties and performance of natural-fibre composites. Woodhead Publishing Limited. Cambridge. s. ISBN 978-1-84569-459-3.
- Roy, S. ja Lutfar, L. 2012. Bast fibres: jute. Julkaisussa: Kozlowski, R. (toim.). Handbook of Natural Fibres. Volume 1: Types, Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation. Woodhead Publishing Limited, Oxford. s. 24- 45. ISBN: 978-1-84569-697-9.
- Roy, S. ja Lutfar, L. 2012b. Bast fibres: ramie. Julkaisussa: Kozlowski, R. (toim.). Handbook of Natural Fibres. Volume 1: Types, Properties and Factors Affecting

- Breeding and Cultivation. Woodhead Publishing Limited, Oxford. s. 47- 55. ISBN: 978-1-84569-697-9.
- Rahman, S. 2010. Jute – A Versatile Natural Fibre. Cultivation, Extraction and Processing
Julkaisussa: Müssig, J. (toim.). Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications. John Wiley & Sons. Chichester Ltd. s. 135-161. ISBN: 978-0-470-69508-1.
- Rahman, M., Parvin, F., Hasan, M. ja Hoque, E. 2015. Introduction to Manufacturing of Natural Fibre-Reinforced Polymer Composites. Julkaisussa: Salit, M.S., Jawaidd, J., Yusoff, N.B. ja Hoque, M.E. (toim.). Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites. Springer International Publishing AG Switzerland. New York, London. s. 17-41. ISBN 978-3-319-07944-8.
- Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. ja Komppa V. 2007. Komposiittirakenteet. Muoviyhdistys Ry, Helsinki. 494 s.
- Sapuan, S. M., Sanyang, L. ja Sahari, J. 2015. Development and properties of sugar palm fiber reinforced polymer composites. Julkaisussa: Thakur, K. ja Kessler, M.R. (toim.). Green biorenewable biocomposites: From Knowledge to Industrial Applications. Apple Academic Press, Inc. Oakville. s. 289-322 ISBN: 978-1-4822-5267-5.
- Sengupta, T. ja Han, J. 2014. Surface Chemistry of Food, Packaging, and Biopolymer; Julkaisussa: Han, J. (toim.). Innovations in Food Packagin. Elsevier Ltd, London. s. 51- 86. ISBN 978-0-12-394835-9.
- Silva, T.C., Silva, D. ja Lucia, A. 2015. The Multifunctional Chemical Tunability of Wood-Based Polymers for Advanced Biomaterials Applications. Julkaisussa: Thakur, K. ja Kessler, M.R. (toim.). Green biorenewable biocomposites: From Knowledge to Industrial Applications. Apple Academic Press, Inc. Oakville. s. 289-322 ISB: 978-1-4822-5267-5.
- Sirviö, J. 2008. Fibers and bonds. Julkaisussa: Paper Physics. Papermaking sience and technology, Book 16. Gummerus Oy, Jyväskylä. s. 137-162.
- Sreekumar, P. ja Thomas, S. 2008. Matrices for natural fibre reinforced composites. Julkaisussa: Pickering, K. (toim.). Properties and performance of natural-fibre composites. Woodhead Publishing Limited. Cambridge. s.67-126. ISBN 978-1-84569-459-3.
- Thakur, V., Thakur, M. ja Singha, A. 2013. Biomass-based Biocomposites: A Perspective on the Future. Julkaisussa: Thakur, V. ja Singha, A. (toim.). Biomass-based

- Biocomposites. Smithers Rapra Technology Ltd. Shrewsbury. s. 1-10. ISBN: 978-1-84735-982-7.
- Stokke, D., Wu, Q. and Han, G. 2014. Introduction to Wood and Natural Fiber Composites. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester. 315 s. ISBN: 9780470710913.
- UPM ProFi. 2017. UPM ProFi Deck -komposiittiterassivalikoima. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.upmprofi.fi/helppohoittoiset-terassit/design-deck-komposiittiterassi/Pages/Default.aspx#section3>. [Viitattu 27.4.2018].
- Wiedenhoeft 2010. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. General Technical Report FPLGTR-190, Forest Products Laboratory, Madison, 205 s.
- Winandy, J. ja Williams, R. Ruidie, A and Ross, R. 2008. Opportunities for using wood and biofibers for energy, chemical feedstocks, and structural applications. Julkaisussa: Pickering, K. (toim.). Properties and performance of natural-fibre composites. Woodhead Publishing Ltd, Cambridge. s. 330-355.
- Zini, E. ja Scandola, M. 2011. Green Composites: An Overview. Society of Plastics Engineers: 1905-1915.

LIITE 1 - SR-LUKU

Kuitu	SR-luku	Paino (g)	SR -luvun korjaus	Korjattu SR-luku
Jauhamaton koivu	14	1,69	1,5	15,5
Jauhamaton koivu	15	1,62	2,3	17,3
Keskiarvo	15	1,65	1,6	16,6
Jauhettu koivu	30	1,70	3,5	33,5
Jauhettu koivu	28	1,69	3,3	31,3
Keskiarvo	29	1,7	3,4	32,4
Jauhamaton euca	14	1,5	2,7	16,7
Jauhamaton euca	14	1,5	2,7	16,7
Keskiarvo	14	1,5	2,7	16,7
Jauhettu euca	26	1,6	4,3	30,3
Jauhettu euca	27	1,7	3,2	30,2
Keskiarvo	27	1,7	3,2	30,2

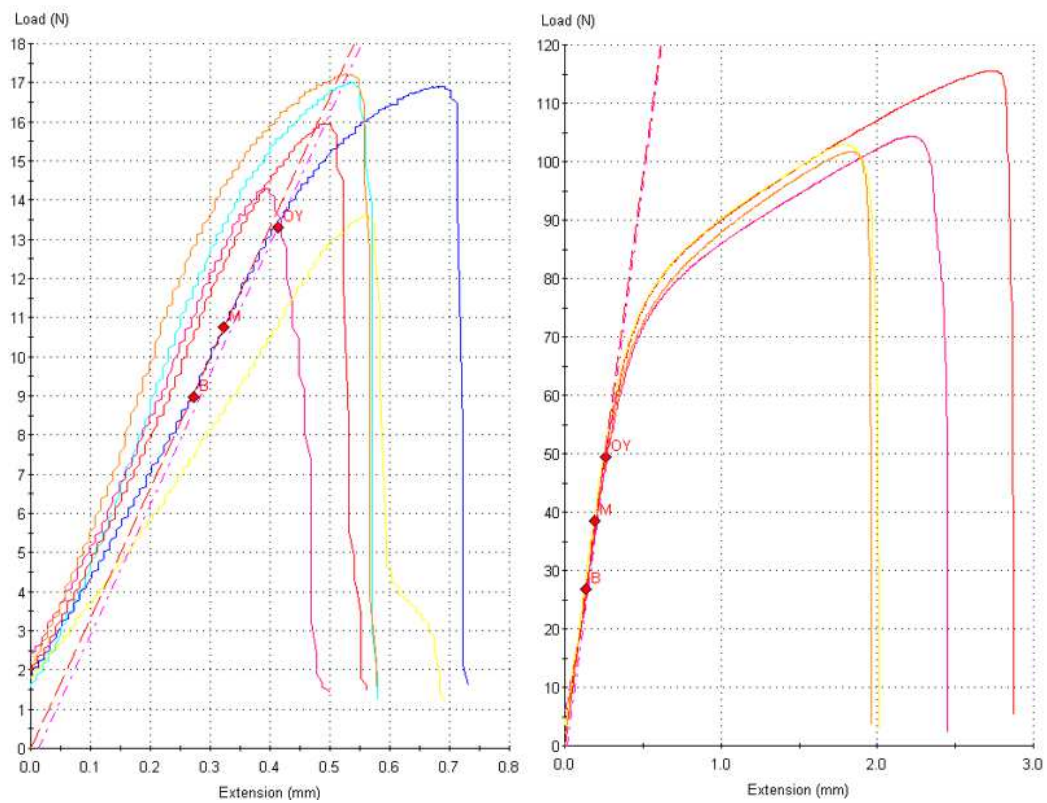
LIITE 2 - ILMANLÄPÄISEVYYS

Ilmanläpäisevyys	E0	E30	K0	K30
Hyväksytyt tulokset, kpl	1	14	0	9
Alue 10 cm ²				
Mean um/Pa s	63,93	5,27		2,097
std.dev		0,4		0,2
var %		7,2		7,4
max	63,93	5,91		2,377
min	63,93	4,59		1,908
Ilmanläpäisevyys				
Mean ml/min	3475	447		180,5
std.dev		31,6		13,3
var %		7,1		7,4
max	3475	500		204,4
min	3475	391		164,4

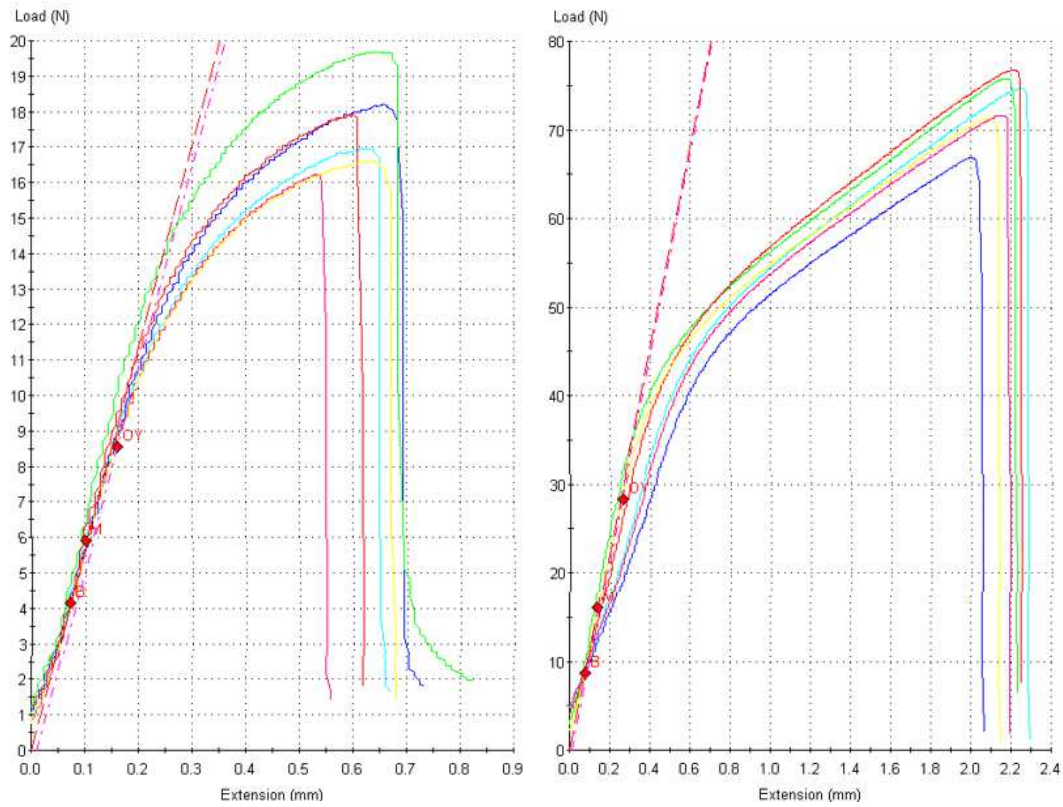
LIITE 3 - MITTAUSTULOKSET

	E0_Kuitu	E30_Kuitu	E0_PP	E30_PP	K0_Kuitu	K30_Kuitu	K0_PP	K30_PP	E30_PLA	K30_PLA	PP
Gr	84,2	83,2	197,8	202,8	85,1	81	199,5	190,4	198,8	202,2	1136,0
Paksuus (µm)	0,183	0,140	0,299	0,306	0,183	0,129	0,338	0,274	0,235	0,282	1,5
Murtovenymä (mm)	0,50	2,00	2,15	1,86	0,61	2,14	1,70	1,94	0,99	1,03	6,25
Murtovenymä %	1,0	4,0	4,3	3,7	1,2	4,3	3,4	3,9	2,0	2,1	12,5
Kimmomoduuli (Gpa)	0,79	2,77	2,24	2,37	1,08	2,48	2,01	2,43	4,10	3,30	0,53
kyysindeksi (MN*m/kg)	1,72	4,67	3,38	3,58	2,33	3,95	3,41	3,50	4,85	4,60	0,70
TEA Indeks (J/kg)	80	1549	1196	1250	118	1805	982	1158	791	787	2490
Vetomurtotyö (J/m ²)	7	129	237	253	10	146	196	221	157	159	2828
Vetolujuusindeksi (kN*m/kg)	13	54	36	46	14	60	39	40	63	59	25
Vetojäykkyys (kN/m)	145	388	669	725	198	320	680	667	963	929	789
Vetolujuus (kN/m)	1,1	4,5	7,1	9,4	1,2	4,9	7,8	7,7	12,5	11,9	29,0
Yield strain %	0,643	0,435	0,438	0,542	0,342	0,752	0,538	0,442	0,661	0,650	1,347
Myötölujuus (kN/m)	0,81	1,55	2,76	3,77	0,63	2,18	3,50	2,79	6,12	5,82	10,33
Taivutusjäykkyys xa: (mNm) Kulma 0-7,5°	0,069	0,068	0,072	0,061	0,471	0,748	0,59	0,432	0,432	0,464	84,6
Taivutusjäykkyys s: (mNm)	0,006	0,004	0,008	0,007	0,069	0,308	0,101	0,071	0,116	0,087	7,8
Taivutusjäykkyys CoV: %	9,0	6,2	11,7	11,9	14,7	41,1	17,0	16,4	26,8	18,9	9,2
Taivutusvastus xa: (mN) Kulma 0-30°	25,3	26,9	25,9	25,1	226	332	294	201	249	262	1737
Taivutusvastus s: (mN)	1,7	1,6	2,5	1,9	28	123	55	36	82	46	198
Taivutusvastus CoV: %	6,89	6,13	9,58	7,71	12,3	37,1	18,7	18,1	33	17,4	11,4
Taivutusjäykkyys mNm (lask)	0,40	0,63	4,98	5,66	0,55	0,44	6,47	4,17	4,43	6,16	148,41

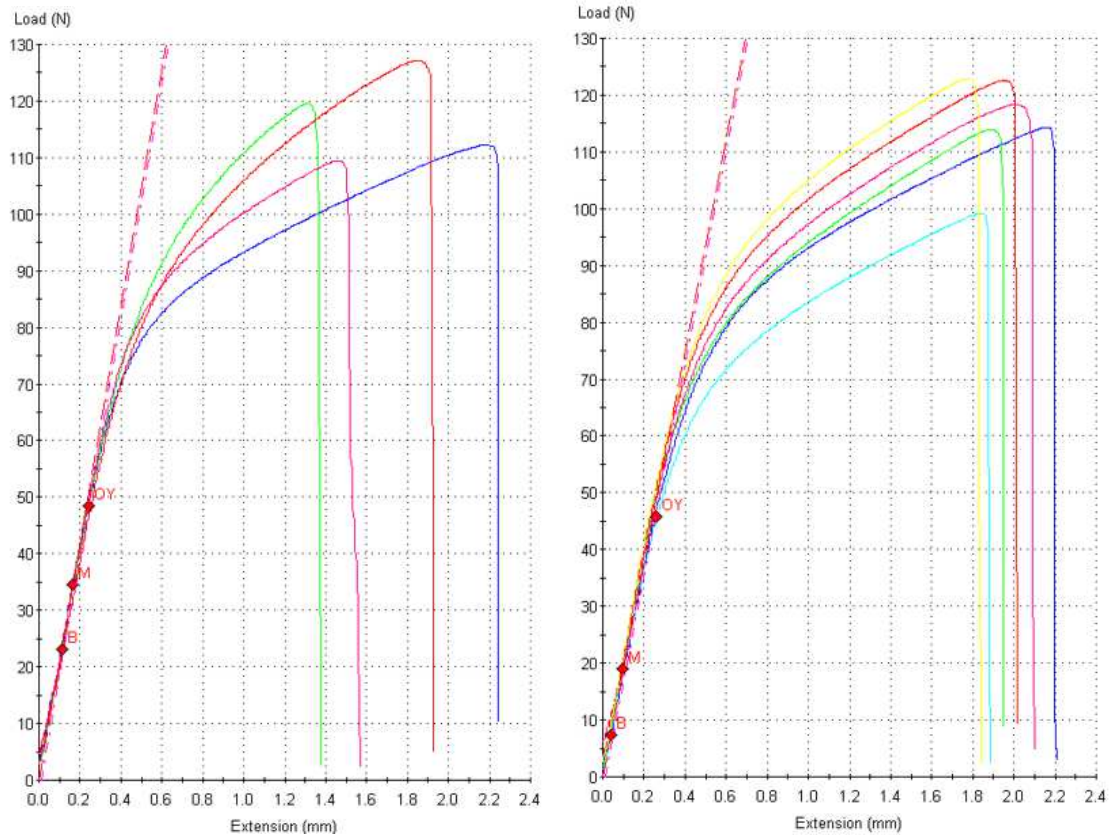
LIITE 4 - VOIMAVENYMKÄYRÄT



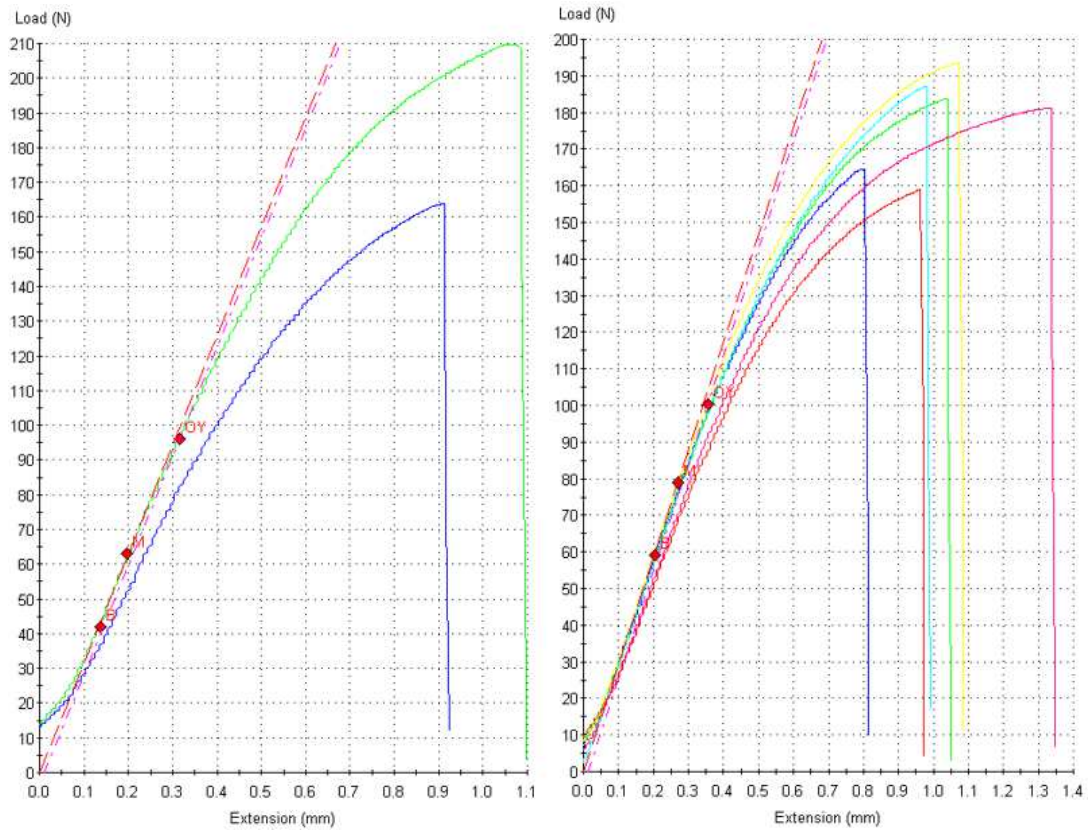
Kuva 1. Vasemmalla E0_Kuitu ja oikealla E0PP voimavenymäkäyrät.



Kuva 2. Vasemmalla K0_Kuitu ja oikealla K30_Kuitu voimavenymäkäyrät.



Kuva 3. Vasemmalla K0PP ja oikealla K30PP voimavenymäkäyrät.



Kuva 4. Vasemmalla E30PLA ja oikealla K30PLA voimavenymäkäyrät.